



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LAURI HIETAHARJU
JÄYKISTÄMÄTTÖMIEN PALKKI-PILARI PÄÄTYLEVYLIITOSTEN
MITOITUS JA KUSTANNUSOPTIMOINTI

Diplomityö

Tarkastaja: yliopistotutkija Kristo Mela
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
11. kesäkuuta 2018

TIIVISTELMÄ

Lauri Hietaharju: Jäykistämättömien palkki-pilari päätylevyliitosten mitoitus ja kustannusoptimointi

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 104 sivua, 25 liitesivua

Elokuu 2018

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Koneiden ja rakenteiden analysointi

Tarkastaja: yliopistotutkija Kristo Mela

Avainsanat: päätylevyliitos, kiertymäjäykkyys, osittain jäykkä liitos, komponenttimenetelmä, kustannuslaskenta, kustannusoptimointi

Työssä keskityttiin H- ja I-profilisten tasokehien jäykistämättömien palkki-pilari -päätylevyliitosten mitoitukseen sekä kustannusoptimointiin. Kustannusten minimointitehtävä kirjoitettiin matemaattiseksi optimointiongelmaksiksi, jossa rajoitusehtoina olivat liitoksen kestävyydelle ja alkujäykkyydelle annetut raja-arvot sekä liitoksen geometriaa säätelevät ehdot. Suunnittelumuuttujina tehtävässä olivat päätylevyn dimensiot ja ruuvien sijainti. Ruuvien koko ja ruuvirivinen lukumäärä pidettiin kiinteinä parametreina. Liitosmitoitus tehtiin käyttäen standardissa SFS EN 1993-1-8 esitettyä komponenttimenetelmää. Liitosten kustannuksissa otettiin huomioon materiaalikustannusten lisäksi valmistuskustannukset, joihin sisältyivät mm. reikien tekeminen, hitsaaminen ja levyn leikkaaminen. Tehdyillä mitoitus- ja optimointityökaluilla vertailtiin tuloksia aiempiin kustannusoptimointia käsitteleviin tutkimuksiin sekä tutkittiin liitosten kustannusten muodostumista erilaisissa tilanteissa.

Päätylevyliitosten ominaisuuksien tarkastelussa kiertymäjäykkyyden määrittämisessä havaittiin, että jäykistämättömästä päätylevyliitosta saattaa olla hankala saada täysin jäykäksi sekä sivusiirtymättömillä, että sivusiirtyvillä kehillä. Lisäksi kiertymisjäykkyyden määrittämisessä havaittiin epäintuitiivinen piirre, että liitosjäykkyyttä ei välttämättä pystytä kasvattamaan vain ruuvirivien määrää lisäämällä. Tietyissä tapauksissa liitoksen momenttivarren suhteellisesti merkittävämpi pienentyminen ruuvirivien tuomaan jäykkyyteen nähden voi aiheuttaa liitosjäykkyyden pienenemisen.

Vertailututkimuksen avulla saatiin hyvä kuva komponenttimenetelmän käytettävyydestä liitosmitoitukseen ja optimointiin. Aiempiin tutkimuksiin verrattuna komponenttimenetelmällä liitosmitoitus pystyttiin suorittamaan huomattavasti monipuolisemmin ja monipuolisuuden kautta myös liitoskustannuksia saatiin selvästi pienennettyä. Myös laskenta-ajan suhteen komponenttimenetelmä todettiin hyväksi.

Tarkastelujen mukaan suurin osa merkittävistä päätylevyliitosten kustannuksista muodostuu päätylevyn leikkaus- ja hitsauskustannuksista sekä levyn ja ruuvien materiaalikustannuksista. Kyseisten havaintojen pohjalta liitosmitoituksessa pystytään keskittymään paremmin kustannuksia aiheuttaviin liitoksen ominaisuuksiin. Tarkastelujen mukaan liitoksen kustannukset pysyvät lähes vakiona, kunnes kiertymäjäykkyys kasvaa niin suureksi, että ruuvikokoa joudutaan kasvattamaan tai ruuvirivien määrää joudutaan lisäämään. Momenttikapasiteetin suhteen liitoksen kustannukset kasvavat alussa tasaisemmin, mutta kasvavat suurilla momenttikapasiteeteilla samaan tyyliin.

ABSTRACT

Lauri Hietaharju: Design and cost optimization of unstiffened beam-column end-plate connections

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 104 pages, 25 Appendix pages

August 2018

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Analysis of machines and structures

Examiner: Senior research fellow Kristo Mela

Keywords: end-plate connection, rotational stiffness, semi-rigid connection, component method, cost calculation, cost optimization

Main objective of this thesis was to analyze design and cost optimization of unstiffened beam-to-column end-plate joints in plane frames. Cost minimization of end-plate connections was carried out by converting problem into mathematical optimization problem, where connection capacity, rotational stiffness and geometrical constraints were used as constraints in optimization. Endplate dimensions and location of bolts were used as design variables, while bolt size and number of rows were taken to be static parameters. Connection design was carried out using component method presented in standard SFS EN 1993-1-8. In addition to material cost, also manufacturing cost of connection was considered, which for example included manufacturing of bolt holes, welding of end-plate to beam and cutting end-plate to size. Various studies defining connection cost properties and comparing results of this thesis and prior research were carried out by using design and optimization tools made during the thesis.

One clear result from studying connection rotational stiffness was that manufacturing of unstiffened end-plate connections to be full stiffness may be hard in both non-sway and sway frames. Also, un-intuitive property of end-plate connections rotational stiffness was discovered. Adding more bolt rows might not increase rotational stiffness of the connection as influence of decreasing lever arm of the connection can be relatively greater than increase in stiffness from the new rows.

Good understanding of effectiveness of component method was obtained from the comparison study to prior studies. Designing of connections was considerably more versatile with component method compared to meta-model used in comparison study and there was clear reduction in connection cost in optimized connections. It is also clear that component method is effective designing method according to calculation time.

From connection cost studies, it was concluded that major part of the cost accumulates from cutting, welding and material cost. From these finding, in further studies and designs it is easier to concentrate on features of connections that influences the cost most. According to studies carried out, the connection cost stays almost constant until connection stiffness rises so high that either bolt size or number of bolt rows must be changed. For moment capacity findings in studies were likewise, except that increase in connection cost with small capacities was more gradual.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitokselle osana teräsrakenteiden mitoitus- ja optimointia tutkivia tutkimusprojekteja. Työn tavoitteena on käyttää matemaattista optimointiteoriaa liitosmitoituksen automatisoimiseksi ja päätylevyliitosten kustannusrakenteen tutkimiseksi. Työllä pyritään myös rakentamaan pohjaa tulevia tutkimusprojekteja varten muun muassa tekemällä yleinen liitosmitoituspohja käytettäväksi tulevilla jatkotutkimuksissa.

Työn tarkastajana toimi yliopistotutkija Kristo Mela TTY:ltä ja ohjaajana DI Ville Laine A-Insinöörit Suunnittelu OY:stä, joita haluan kiittää suuresti hyvistä neuvoista ja ohjauksesta koko diplomityöni ajalta. Lisäksi haluan kiittää kaikkia työkavereitani A-Insinöörit Suunnittelu OY:ssä sekä TTY:llä avusta ja innostamisesta työn teossa. A-Insinöörejä haluan kiittää yleisesti mahdollisuudesta työn tekemiselle TTY:lle.

Erityiskiitokset haluan antaa perheelleni ja ystävilleni tuesta ja kannustuksesta koko opiskeluajaltani.

Tampereella, 27.8.2018

Lauri Hietaharju

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Työn tavoitteet	3
2.	LIITOKSET RAKENTEISSA	4
2.1	Liitosten mallinnus ja mitoitus	5
2.2	Liitosjäykkyyden vaikutus rasituksiin	6
3.	PÄÄTYEVYLIITOSTEN SUUNNITTELU JA MITOITUS	9
3.1	Päätylevyliitosten mitoitus komponenttimenetelmällä	9
3.2	Päätylevyliitosten mallinnus rakennemallissa	12
3.2.1	Peruskomponentit	14
3.2.2	Ekvivalentti T-osa	16
3.2.3	Ruuvirivit ja ruuvirivien ryhmät	19
3.3	Liitosluokitus	23
3.4	Momenttikestävyys	29
3.5	Kiertymisjäykkyys ja kiertymiskyky	31
3.6	Peruskomponenttien laskenta	35
3.6.1	Pilarin uuman leikkaus	36
3.6.2	Pilarin uuman poikittainen puristus	38
3.6.3	Palkin laipan ja uuman puristus	40
3.6.4	Pilarin laipan taivutus	41
3.6.5	Pilarin uuman poikittainen veto	43
3.6.6	Päätylevyn taivutus	44
3.6.7	Palkin uuman veto	47
3.6.8	Ruuvien kapasiteetti	48
3.6.9	Hitsit	51
3.7	Liitosmitoitushjelma	56
4.	KUSTANNUSLASKENTA	58
4.1	Kustannusten muodostuminen	59
4.2	Materiaalikustannukset	61
4.3	Työvaiheiden kustannukset	61
4.3.1	Levyn hiekkapuhallus	62
4.3.2	Levyn leikkaus	63
4.3.3	Hitsaus	64
4.3.4	Jälkitarkastus	65
4.3.5	Maalaus	65
5.	KUSTANNUSOPTIMOINTI	67
5.1	Kohdefunktio	67
5.2	Suunnittelumuuttujat	68
5.3	Rajoitusehdot	70
5.4	Jatkuvuus ja oletukset	72
5.5	Käytettävä optimointialgoritmi	76

5.6	Liitosoptimoinnin liittäminen rakenneosien mitoituseseen sekä optimointiin	78
6.	VERTAILUTUTKIMUKSET	81
6.1	Kiertymäjäykkyyden ja momenttikapasiteetin ääriarvot	81
6.1.1	Ruuvirivien lisäämisen vaikutus	86
6.2	Vertailututkimus aiempiin tutkimuksiin	89
6.3	Kiertymäjäykkyyden ja momenttikapasiteetin vaikutus kustannuksiin	94
6.3.1	Kiertymäjäykkyyden vaikutus	94
6.3.2	Momenttikapasiteetin vaikutus	97
7.	YHTEENVETO.....	100
7.1	Esitetyt jatkotutkimukset.....	103
	LÄHTEET	105

Liite A: Päätylevyliitoksen kiertymäjäykkyyden johtaminen jousimallista

Liite B: Kustannusfunktioiden tiedot

Liite C: Ruuvirivin lisäämisen vaikutus kiertymäjäykkyyteen, vain yksi ruuvirivi, laskentapohja

Liite D: Ruuvirivin lisäämisen vaikutus kiertymäjäykkyyteen, kaksi ruuviriviä, laskentapohja

LYHENTEET JA MERKINNÄT

FEM	Finite element method
B	Hiekkapuhallus, engl. Blasting
Cu	Leikkaus, engl. Cutting
P	Maalaus, engl. Painting
PA	Liitoksen kokoaminen/hitsaus, engl. Part assembly
PT	Jälkitarkastus, engl. Post treatment
SM	Materiaalikustannukset, engl. Material cost
MAG M	engl. Metal arc welding with mixed gas
MT	Magneettipartikkelitarkastus
UT	Ultraääni tarkastus
VT	Visuaalinen tarkastus
SLSQP	engl. Sequential least squares quadratic programming
a_f	Päätylevyn ja palkin laipan välisen hitsin a-mitta
a_w	Päätylevyn ja palkin uuman välisen hitsin a-mitta
A	Poikkileikkauksen kokonaispinta-ala
A_p	Maalattava pinta-ala
A_s	Ruuvien jännityspinta-ala
A_v	Uuman leikkauspinta-ala
A_{vs}	Vuotuinen sijoituksen aiheuttama menoerä
b	Poikkileikkauksen leveys
$b_{eff.c.wc}$	Puristetun alueen efektiivinen leveys
$b_{eff.t.wb}$	Päätylevyn laipan T-osan tehollinen leveys vedossa
$b_{eff.t.wc}$	Pilarin laipan T-osan tehollinen leveys vedossa
C_{SMBP}	Materiaalin perushinta
C_{SMG}	Materiaalilaadun mukainen lisä
C_{SMT}	Levyn paksuuslisä
C_{SMQ}	Levymäärälisä
C_{SMQT}	Levynpaksuuden levymäärän lisä
C_{SMUT}	Ultraäänitarkastuslisä
C_{Bi}	Ruuvien yksikköhinta
C_{Ni}	Mutterien yksikköhinta
C_{wi}	Aluslevyjen yksikköhinta
C_{Lk}	Työntekijöiden palkkojen yksikkökustannus
C_{Eqk}	Laitteistokustannukset
C_{Mk}	Laitteiston huoltokustannukset
C_{REk}	Työalueen ostokustannukset
C_{Sek}	Työalueen ylläpitokustannukset
C_{Ck}	Ajasta riippuvien kulutustavaroiden kustannukset
C_{ck}	Ajasta riippumattomien kulutustavaroiden kustannukset
C_{Enk}	Energiakulutuksen aiheuttamat kustannukset
C_B	Hiekkapuhalluskustannukset
C_{BW}	Hitsatun palkin tai pilarin hitsauskustannukset

C_{Cu}	Leikkauskustannukset
C_{Co}	Viisteiden tekokustannukset
C_D	Palkin ja pilarin reikien poraamiskustannukset
C_E	Pystytyskustannukset
C_P	Maalaus-kustannukset
C_{PA}	Osien liittämiskustannukset
C_{PF}	Pienempien osakokonaisuuksien valmistuskustannukset
C_{PT}	Jälkitarkastuskustannukset
C_S	Palkin mittaan leikkaamisen kustannukset
C_{SM}	Materiaalikustannukset
C_T	Liitoksen kokonaiskustannukset
C_{Tr}	Siirtokustannukset
d	Ruuvien nimellishalkaisija
d_0	Ruuvien reiän halkaisija
d_w	Aluslaatan halkaisija tai ruuvien kannan tai mutterin keskimääräinen halkaisija
d_{wc}	Pilarin uuman suoran osan pituus
d_{wb}	Palkin uuman suoran osan pituus
dl	Liitoksen eri ruuvikokojen määrä
e	ruuvien reunaetäisyys vapaaseen reunaa
e_1	Ruuvien reunaetäisyys voiman suunnassa
e_2	Ruuvien reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuorassa suunnassa
e_{min}	ruuvien minimi reunaetäisyys vapaaseen reunaan pilarin laipan tai päätylevyn mukaan
e_x	Ensimmäisen ruuvirivin reunaetäisyys päätylevy yläreunaan ylime- nevän päätylevyn tapauksessa
E_b	Palkin kimmokerroin
E_c	Pilarin kimmokerroin
f_y	Materiaalin myötöraja
f_u	Materiaalin murtoraja
f_{ub}	Ruuvien vetomurtolujuus
F_f	Laippojen hitsien kuorma liitoksen momentista
$F_{T.1.Rd}$	T-osan murtomuodon 1 kapasiteetti
$F_{T.2.Rd}$	T-osan murtomuodon 2 kapasiteetti
$F_{T.3.Rd}$	T-osan murtomuodon 3 kapasiteetti
$F_{T.1-2.Rd}$	T-osan murtomuotojen 1 ja 2 kapasiteetti, kun vipuvoimia ei synny
$F_{t.Rd}$	Yhden ruuvien vetokapasiteetti
$F_{v.Rd}$	Yhden ruuvien leikkauskapasiteetti
$F_{b.Rd}$	Yhden ruuvien reunapuristuskapasiteetti
$F_{V.Rd}$	Ruuvien mitoitusleikkauskapasiteetti
$F_{V.Ed}$	Ruuvien suunnitteluleikkausvoima
$F_{t.Ed}$	Ruuvien suunnitteluvetovoima
$F_{c.wc.Rd}$	Pilarin uuman kapasiteetti poikittaisessa puristuksessa
$F_{c.fb.Rd}$	Palkin uuman ja laipan kapasiteetti puristuksessa
$F_{tr.Rd}$	Ruuvirivien r vetokapasiteetti
$F_{t.Rd.group}$	Ruuvirivien muodostaman ruuviryhmän vetokapasiteetti kapasiteetti
$F_{comp.Rd}$	Puristuspuolen kapasiteetti
$F_{t.wc.Rd}$	Pilarin uuman vetokapasiteetti poikittaisessa vedossa
h	Poikkileikkauksen korkeus

h_r	ruuvirivin r etäisyys puristuskeskiöstä
i_{vs}	Korkoprosentti
I_b	Palkin neliömomentti
I_c	Pilarin neliömomentti
k_1	Pilari uuman jäykkyys leikkauksessa
k_2	Pilarin uuman jäykkyys poikittaisessa puristuksessa
k_3	Pilarin uuman jäykkyys vedossa
k_4	Pilarin laipan jäykkyys taivutuksessa
k_5	Päätylevyn jäykkyys taivutuksessa
k_7	Palkin uuman ja laipan jäykkyys puristuksessa
k_8	Palkin uuman jäykkyys vedossa
k_{10}	Ruuvien jäykkyys vedossa
k_{19}	Hitsien jäykkyys
k_b	Jäykän liitoksen jäykkyysrajan kerroin
k_{comp}	Puristuspuolen ekvivalentti jäykkyys
k_{eq}	Vetopuolen ekvivalentti jäykkyys
$k_{eff,r}$	Ruuvirivin r vetojäykkyys
$k_{\omega c}$	Pilarin akselin suuntaisen jännityksen huomioiva pienennystekijä
$l_{eff,1}$	pyöreän murtoviivan ekvivalentti T-osan pituus
$l_{eff,2}$	ei-pyöreän murtoviivan ekvivalentti T-osan pituus
$l_{eff,nc}$	pyöreän myötökuvion efektiivinen leveys
$l_{eff,cp}$	ei-pyöreän myötökuvion efektiivinen levey
l_{eff}	T-osan efektiivinen leveys
$l_{eff,f}$	Laipan hitsien tehollinen pituus
$l_{eff,w}$	Uuman hitsien tehollinen pituus
l_{lo}	Päätylevyn ylimenevän osan pituus palkin alapuolella
l_{up}	Päätylevyn ylimenevän osan pituus palkin yläpuolella
L_b	Ruuvien venymäpituus
L_b^*	Ruuvien vipuvoimien mukainen verrannollinen venymäpituus
L_B	Hiekkapuhallettavan osan maksimi dimensio (päätylevyn korkeus tai leveys)
L_{Cu}	Leikkauspituus, jossa huomioidaan päätylevyn ulkomitat sekä ruuvien reikien leikkaaminen
L_{fw}	Hitsattava pituus
L_{UT}	Ultraäänitutkittavien hitsien pituus
L_{MT}	Magneettipartikkelitarkastettavien hitsien pituus
m	ruuvien reunaetäisyys uumaan
m_x	Ruuvien reunaetäisyys palkin laippaan
$M_{j,b1.Ed}$	Oikeanpuoleisen liittyvän palkin taivutusmomentti
$M_{j,b2.Ed}$	Vasemmanpuoleisen liittyvän palkin taivutusmomentti
$M_{pl,1.Rd}$	Murtumismallin 1 T-osan ekvivalentti plastinen taivutuskestävyys
$M_{pl,2.Rd}$	Murtumismallin 2 T-osan ekvivalentti plastinen taivutuskestävyys
$M_{bp.Rd}$	Murtumismallin T-osan ekvivalentti plastinen taivutuskestävyys taustalevyjä käytettäessä
$M_{j,full}$	Täysin lujan liitoksen raja
$M_{b,pl.Rd}$	Palkin plastinen momenttikapasiteetti
$M_{c,pl.Rd}$	Pilarin plastinen momenttikapasiteetti

$M_{j.pinned}$	Nimellisesti nivelellisen liitoksen raja
M_{Ed}	Suunnittelumomentti
$M_{j.Rd}$	Momenttikapasiteetti
$M_{j.target}$	Momenttikapasiteetin tavoitearvo
$M_{c.Rd}$	Palkin taivutuskestävyyden mitoitusarvo
n_{vs}	Takaisinmaksuaika vuosissa
n_r	Ruuvirivien määrä
n_i	Tiettyä ruuvikokoa olevien ruuvien määrä
$N_{b1.Ed}$	Oikeanpuoleisen liittyvän palkin normaalivoima
$N_{b2.Ed}$	Vasemmanpuoleisen liittyvän palkin normaalivoima
$N_{c1.Ed}$	Pilarin normaalivoima liitoksen alapuolella
$N_{c2.Ed}$	Pilarin normaalivoima liitoksen yläpuolella
$N_{j.Ed}$	Suunnittelu puristus-/vetovoima
$N_{j.Rd}$	Puristus-/vetokapasiteetti
p_1	Ruuvien keskiöetäisyys voiman suunnassa
p_2	Ruuvien keskiöetäisyys voimaa vastaan kohtisuorassa suunnassa
P_{vs}	Alkuperäinen sijoitettu summa
r	Valssatun poikkileikkauksen sisäpyöristyksen säde
s	Pilarin sisäpyöristyksen säde/uuman hitsin suurin leveys
s_p	Jännitysjakaman leveys päätylevyn, pilarin laipan ja pilarin sisäpyöristyksen yli
$S_{j.ini}$	Liitoksen alkukiertymäjäykkyys
$S_{j.sec}$	Sekanttijäykkyys
$S_{j.min}$	Kiertymäjäykkyyden tavoitearvon alaraja-arvo
$S_{j.max}$	Kiertymäjäykkyyden tavoitearvon yläraja-arvo
$S_{j.target}$	Kiertymäjäykkyyden tavoitearvo
t_w	Uuman paksuus
t_f	Laipan paksuus
t_{bp}	jäykistävän taustalevyn paksuus
t_p	Päätylevyn paksuus
T_{Nk}	Työvaiheen tuottamaton aika
T_{Pk}	Työvaiheen tuottava aika
T_{UT}	Tarkastusnopeus ultraäänitarkastuksessa
T_{MT}	Tarkastusnopeus magneettipartikkelitarkastuksessa
T_{Pfw}	Pienahitsin hitsaamiseen kuluva aika
T_{PTA}	Pistehitsaukseen kuluva aika
u_k	Työvaiheen käyttöaste
v_c	Hiekkapuhalluskoneen kuljettimen nopeus
$V_{b1.Ed}$	Oikeanpuoleisen liittyvän palkin leikkausvoima
$V_{b2.Ed}$	Vasemmanpuoleisen liittyvän palkin leikkausvoima
$V_{c1.Ed}$	Pilarin leikkausvoima liitoksen alapuolella
$V_{c2.Ed}$	Pilarin leikkausvoima liitoksen yläpuolella
$V_{v.Rd}$	Vain leikkausta siirtävän ruuvirivin leikkauskapasiteetti
$V_{t.Rd}$	Vetoa sekä leikkausta siirtävän ruuvirivin leikkauskapasiteetti
V_{Ed}	Suunnitteluleikkausvoima
$V_{wp.Ed}$	Pilarin uuman leikkauksen kapasiteetti
w	Ruuvien keskiöetäisyys vaakasuunnassa
$W_{pl.Rd.b}$	Palkin plastinen taivutusvastus

$W_{pl.Rd.c}$	Pilarin plastinen taivutusvastus
W_{SMPl}	Levyn paino
z_{eq}	Liitoksen sisäinen momenttivarssi
z_r	Ruuvirivin r etäisyys päätylevyn yläosasta
x_{target}	Suhteellinen tavoitearvo
α	T-osan efektiivisien leveyden kerroin vedetyn laipan alla olevalle ruuviriville
α_b, α_d	Lisäkertoimet ruuvin reunapuristuskapasiteetin määrittämisessä
α_v	Lisäkerroin ruuvin leikkaukskapasiteetin määrittämisessä
β_1	Oikeanpuoleisen liitoksen muunnosparametri
β_2	Vasemmanpuoleisen liitoksen muunnosparametri
β_w	Hitsin korrelaatiokerroin
γ_{M0}	Rakenneosan tai poikkileikkauksen osavarmuus
γ_{M2}	Kiinnitysosien osavarmuusluku
η	Muunnoskerroin
$\eta_{leikkaus}$	Liitoksen käyttöaste leikkausvoimalle
λ_p	Uuman hoikkuus
λ_1	Geometrinen suhde 1
λ_2	Geometrinen suhde 2
λ_1^*	Geometrisen suhteen 1 apumuuttuja
λ_2^*	Geometrisen suhteen 2 apumuuttuja
μ	Jäykkyysuhde
ρ	Levylommahduksen pienennystekijä
ρ_s	Sallittu poikkeama tavoitejäykkyudesta prosentteina
$\sigma_{com.Ed}$	Pilarin uuman suoran osuuden suurin aksiaalinen jännitys
σ_{\perp}	Hitsin tason normaalin suuntainen jännitys
σ_{\parallel}	Hitsin pituussuuntainen normaalijännitys
τ_{\perp}	Hitsin pituussuuntainen leikkausjännitys
τ_{\parallel}	Hitsin poikittaissuuntainen leikkausjännitys
ψ	Jäykkyysuhteen potenssi
ω	Pilarin uumaan vaikuttavan leikkauksen huomioiva pienennystekijä

1. JOHDANTO

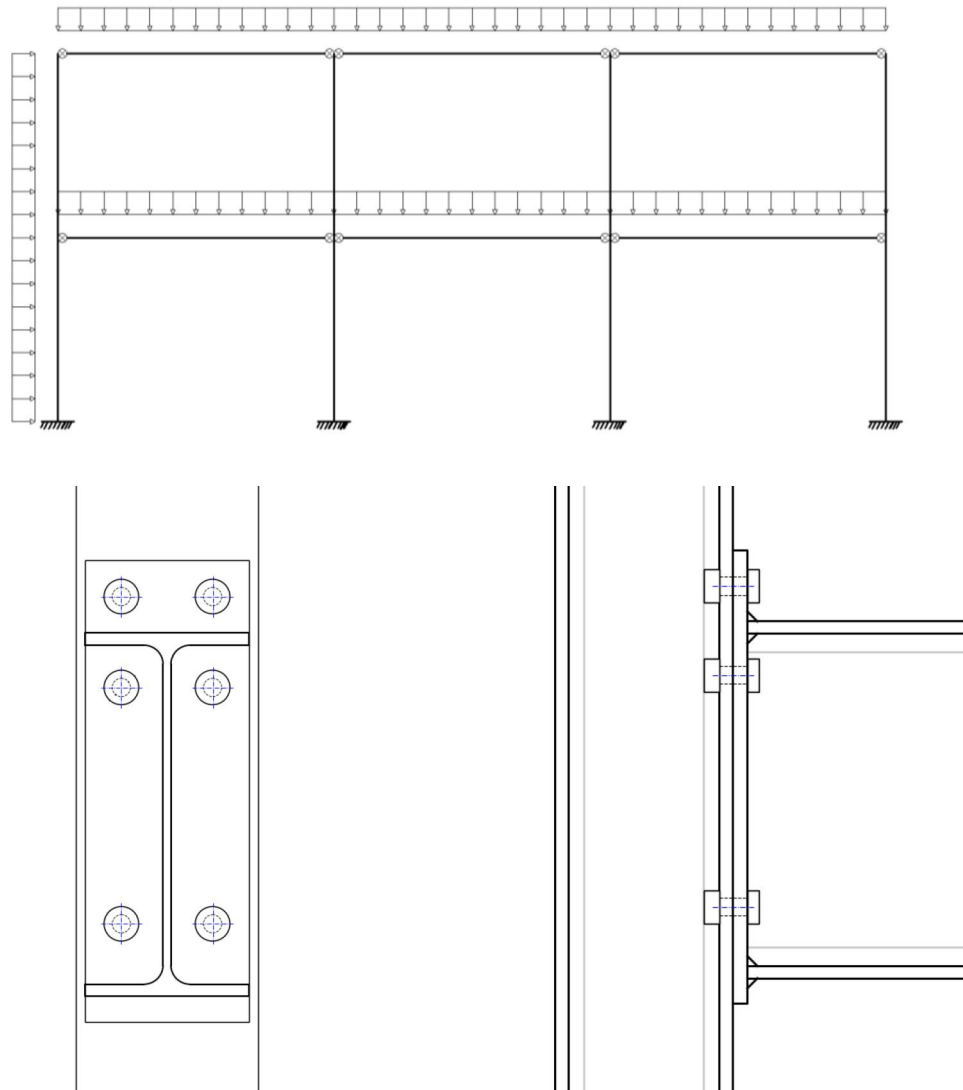
Perinteisen mitoitusmukan liitokset mallinnetaan rakennemalleissa yleensä yksinkertaistettuina joko nivelellisinä tai jäykkinä ja liitokset mitoitetaan rakenneosien mitoituksen jälkeen erikseen. Tämä saattaa kuitenkin johtaa hankaluuksiin liitosmitoituksessa, sillä liitokset tulisi mitoittaa vastaamaan alkuperäisiä olettamuksia. Esimerkiksi jäykäksi oletettu liitos tulisi myös mitoittaa jäykäksi, joka ei kuitenkaan kaikissa tilanteissa ole helposti tehtävissä ilman liitoksen vahvistamista ja saattaa siten kasvattaa liitoskustannuksia huomattavasti. Nivelellisillä liitoksilla taasen rakenneosien kuormat kasvavat usein selvästi suuremmiksi, jolloin rakenneosien kustannukset kasvavat. Näin ollen kustannustehokkaiden rakenteiden mitoittamiseksi myös liitosten kiertymäjäykkyys tulisi huomioida.

Osittain jäykkien liitosten vaikutuksista kehärakenteisiin on tehty paljon tutkimusta ja tutkimusten pohjalta on selvää, että liitosjäykkyys tulisi ottaa huomioon rakenteiden mitoituksessa. Liitosjäykkyyksien huomioimisella rakenne pystytään mallintamaan tarkemmin ja tutkimusten mukaan osittain jäykillä liitoksilla rakenteen kokonaiskustannuksia pystytään pienentämään merkittävästi [3]-[7]. Osittain jäykillä liitoksilla rakenteen rasitukset saadaan jaettua tasaisemmin, joka johtaa pienempiin rakenneosiin ja liitoskuormituksiin. Suurin osa kustannustutkimuksista keskittyvät kuitenkin kehien rakenneosien kustannuksiin ja liitosten kustannusoptimoinnista löytyy vain vähän tietoa. Liitosten kustannukset oletetaan usein olevan suoraan riippuvaisia liitoksen kiertymäjäykkyydestä, mutta tarkempia tutkimuksia aiheesta on tehty vähän. Näin ollen liitosten kustannusten koostumisesta tarvitaan lisää tietoa kustannustehokkaiden liitosten mitoittamiseksi ja liitosjäykkyyksien huomioimisen etujen osoittamiseksi.

Nykyiset standardit, kuten Eurokoodi, esittävät liitoksille myös liitosjäykkyyksien määrityksen, jolloin sekä liitosten kapasiteetti, että jäykkyys pystytään ottamaan huomioon ilman raskaita laskentamenetelmiä. Jokapäiväisessä suunnittelutyössä liitosten mitoitus on kuitenkin usein työlästä liitosten ja liitoskonfiguraatioiden suuren määrän myötä. Työssä liitosmitoitukseen käytetty standardin SFS EN 1993-1-8 [1] esittämä komponenttimenetelmä on tehokas ja monipuolinen, mutta kuitenkin hidas analyyttisessä mitoituksessa. Siten tehokkaimmin komponenttimenetelmän hyvät puolet saadaan käytettyä hyväksi käyttäen standardin pohjalta tehtyjä yleisiä laskentapohjia.

Työssä tarkasteltiin jäykistämättömien palkki-pilari päätylevyliitosten mitoitus, kustannuslaskentaa sekä kustannusoptimointia. Päätylevyliitokset ovat monipuolisia liitoksia, joilla pystytään saamaan aikaiseksi nivellisiä, osittain jäykkiä sekä jäykkiä liitoksia. Pää-

tylevy liitoksia voidaan lisäksi käyttää tarvittaessa hyödyksi myös rakenteen vaakajäykistyksessä. Kuvassa alla (Kuva 1) on esitettyä esimerkki kehärakenteesta ja tässä työssä tarkastellusta liitostyypistä, yksipuolisesta palkki-pilari päätylevyliitoksesta. Liitosmitoitusta tehtiin standardiin SFS EN 1993-1-8 [1] perustuen ja kustannuslaskenta suoritettiin Haapion esittämien kustannusfunktioiden mukaisesti [2]. Liitosmitoitusta ja kustannuslaskenta koodattiin yhteen yleiseksi laskentapohjaksi, jolla liitoksen kapasiteetti, kiertymäjäykkyys sekä kustannukset saatiin määritettyä tehokkaasti.



Kuva 1. Esimerkki tasokehästä ja palkki-pilari päätylevyliitoksesta. Päätylevyliitokset voidaan mitoittaa nivelellisiksi, osittain jäykiksi tai täysin jäykiksi ja ovat siten hyvin monipuolisia liitoksia. Päätylevyliitosten mitoitus on myös helposti parametrisoitavissa käytettäessä standardin SFS EN 1993-1-8 [1] esittämää komponenttimenetelmää.

1.1 Työn tavoitteet

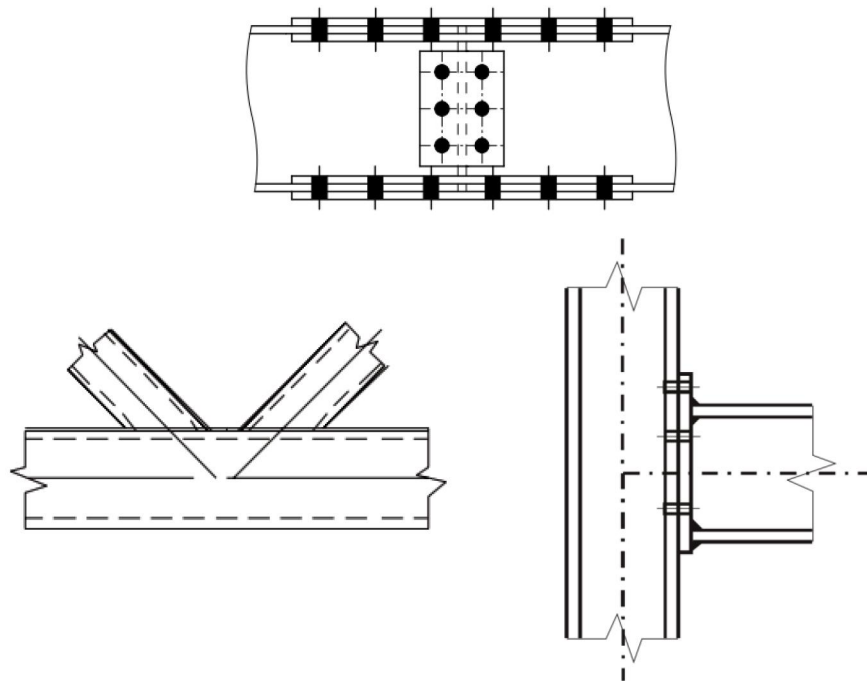
Tässä työssä keskitytään ruuveilla kiinnitettyjen jäykistämättömien palkki-pilari päätylevyliitosten tarkasteluun ja kustannusoptimointiin. Liitosmitoitus tehtiin työn aikana ohjelmoidulla liitosmitoitusohjelmalla, joka perustuu standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaiseen komponenttimenetelmään. Työn aikana tehty liitosmitoitusohjelma pyrittiin saamaan mahdollisimman yleiseksi, jotta se on käyttökelpoinen myös tulevilla tutkimuksissa. Yksi tärkeimmistä työn tavoitteista olikin pohjan tekeminen tuleville tutkimusprojekteille, joissa tarkastellaan liitosmitoituksen ja liitosten kiertymäjäykkyyden vaikutusta rakenteiden mitoitukseen sekä kustannuksiin. Kustannuslaskenta tehtiin Haapion esittämien rakennetietoihin perustuvien kustannusfunktioiden mukaan, jotka ottavat huomioon sekä liitoksen materiaalikustannukset ja valmistuskustannukset [2]. Rakenteen rakenneosien kustannuksia ei tässä työssä tarkasteltu.

Työn vertailututkimusten tavoitteena oli saada tietoa päätylevyliitosten ominaisuuksista ja kustannusten jakaantumisesta. Työssä tarkasteltiin sekä liitosjäykkyyden ja momenttikapasiteetin ääriarvoja ylimenevällä päätylevyliitoksella ja liitoskustannusten jakautumista tarkasteltiin määrittämällä kustannusoptimoidut liitokset testitapaukselle eri liitosjäykkyyksillä ja momenttikapasiteeteilla. Tavoitteena liitosominaisuuksien tarkasteluissa oli löytää määräävimmit liitoksen kustannustekijät, jotta liitosten kustannukset pystyttäisiin ottamaan tehokkaammin huomioon sekä rakenneosien mitoituksessa, että liitosmitoituksessa. Komponenttimenetelmän tehokkuutta liitosmitoituksessa ja optimoinnissa verrattiin aiemmin tehtyyn päätylevyliitosten kustannusoptimointiin keskittyvään tutkimukseen [8] ja vertailussa pyrittiin esittämään menetelmän tehokkuus.

Työn alussa on esitetty lyhyt katsaus liitosten vaikutuksista rakenteeseen kappaleessa 2 ja tämän jälkeen esitellään käytetyt menetelmät päätylevyliitosten mitoituksessa, kustannuslaskennassa sekä optimoinnissa. Liitosmitoituksen, kustannuslaskennan ja kustannusoptimoinnin teoria esitetään kappaleissa 3, 4 ja 5. Tutkimusmenetelmien jälkeen kappaleessa 6 esitellään työssä tehdyt vertailututkimukset ja työn yhteenveto on koostettuna loppuun kappaleeseen 7.

2. LIITOKSET RAKENTEISSA

Rakenteiden mitoituksessa liitokset ovat tärkeässä roolissa kuormien siirtäjinä rakenneosilta toisille ja valittu liitostyyppi vaikuttaa paljon rakenteen kuormien jakautumiseen. Erilaisia liitostyyppejä on huomattavan suuri määrä ja sopivan liitostyyppin valinta sekä liitoksen oikeanlainen mallintaminen rakennemallissa on tärkeää. Käytettävät liitostavat riippuvat paljon tarkasteltavasta rakenteesta sekä liitettävistä rakenneosista, mutta Suomessa teräsrakenteissa yleisemmin käytössä olevia liitoksia ovat mm. ripalevyliitokset, päätylevyliitokset, erilaiset palstalevyliitokset sekä hitsausliitokset (Kuva 2). Teräksen muokattavuus ja hitsattavuus antavat suunnittelijalle kuitenkin suhteellisen vapaat kädet liitosten suunnitteluun.



Kuva 2. Yleisiä liitostyyppejä teräsrakenteissa. Ylhäällä palkki-palkki palstalevyliitos, alhaalla vasemmalla rakenneputkien välinen K-hitsausliitos ja oikealla palkki-pilari päätylevyliitos. [1][9]

Perinteisessä rakenteiden mitoitusavassa liitokset ovat usein yksinkertaistettu joko nivelellisiksi tai täysin jäykiksi rakenneosien mitoituksen yksinkertaistamiseksi ja liitosmitoitusta tehdään vasta rakenneosien mitoituksen jälkeen alkuperäisten oletusten mukaisesti. Edellä esitetyistä liitoksista momenttijäykkiä liitoksia voidaan saada helpoiten aikaiseksi päätylevyliitoksista ja hitsatuista liitoksista, kun taas esimerkiksi ripalevyliitokset oletetaan usein nivelellisiksi. Kyseinen mitoitusmenettely on toimiva, mutta ei kuitenkaan välttämättä esitä rakennetta hyvällä tarkkuudella, sillä todellisuudessa kaikki liitokset omaavat kiertymäjäykkyyttä sekä rajallisen kiertymiskyvyn.

Perinteisessä mitoituksessa käytetyillä yksinkertaistuksilla menetetään tärkeää tietoa rakenteen todellisesta kuormien jakautumisesta ja liitosjäykkyyden vaikutuksista tehtyjen tutkimuksien mukaan liitosten kiertymisjäykkyys tulisi ottaa rakenteiden mitoituksessa huomioon. Nykyaikaisissa standardeissa, kuten Eurokoodissa, liitosjäykkyyden määrittäminen on kuitenkin otettu huomioon ja liitokset pystytään mitoittamaan vastaamaan niiden todellista käyttäytymistä.

2.1 Liitosten mallinnus ja mitoitus

Braham ja Jaspert esittävät tutkimuksessaan, että liitokset jotka omaavat pienen momenttikestävyys voidaan mallintaa rakennemallissa nivellisinä riippumatta kyseisten liitosten kiertymäjäykkyydestä. Tutkimuksen mukaan vain erittäin hoikkien pilarien tapauksessa liitosten yksinkertaistus nivelellisiksi voi johtaa lievään epäkonseptiiviseen mitoitukseseen. Liitosten oletaminen nivelellisiksi edellyttää kuitenkin liitoksilta riittävää kiertymiskykyä sekä sitkeää murtomuotoa. [10] Jäykkien liitosten tapauksessa Thai et al. tekemän tutkimuksen mukaan liitosjäykkyys ei merkittävästi vaikuta rakenteen murtorajatilanteen luotettavuuteen. Tutkimuksen tulosten mukaan kuitenkin käyttörajatilan mitoituksessa liitosten kiertymäjäykkyys vaikuttaa selvästi enemmän ja oletus täysin jäykistä liitoksista voi olla epäkonseptiivinen. [11] Brahamin ja Jaspartin sekä Thai et al. tekemistä tutkimuksista voidaan vetää johtopäätökset, että rakenteen mitoitus yksinkertaistamalla liitokset nivelellisiksi tai jäykiksi saattaa tietyissä tapauksissa johtaa helpommin epäkonseptiiviseen mitoitukseseen kuin liitosjäykkyydet huomioimalla. Perinteinen mitoitus tapa on siis toimiva, kunhan liitosmitoituksessa varmistetaan liitosten toiminnan vastaavan alkuperäisiä oletuksia liitosjäykkyyksistä sekä kapasiteeteista ja liitos omaa riittävän kiertymiskyvyn. Massa- tai kustannusoptimia perinteisellä mitoitusmenettelyllä ei luultavimmin kuitenkaan pystytä saavuttamaan.

Liitosten mallinnus rakennemallissa tehdään yleensä rakenneosien keskiviivojen mukaan. Liitoksissa, joissa epäkeskisyydet aiheuttavat merkittävää lisäkuormaa joko liitoksen osille (esim. ripalevyliitokset) tai kiinnittyville rakenneosille (esim. rakenneputkien liitokset ristikoissa), huomioidaan aiheutuvat kuormitukset rakennemallin epäkeskisyyksillä tai liitosmitoitusvaiheessa analyttisesti. Yleisesti ottaen esimerkiksi ripalevyliitokset mallinnetaan rakennemallissa nivellisinä ja mahdolliset epäkeskisyyksimomentit huomioidaan analyttisesti liitosmitoitusvaiheessa. Rakennemallissa epäkeskisyydet huomioidaan usein esimerkiksi rakenneputkien välisillä liitoksilla teräsristikoissa, joissa liitosten sijoittelu voi aiheuttaa paarteille lisäkuormitusta epäkeskisten liitosten kautta. Standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] annetaan suoraan ohjeita liitosmallinnukseen vain palkkipilari liitoksille sekä rakenneputkien välisille hitsatuille liitoksille.

Itse liitosmitoitukseen on kehitetty suuri määrä eri mitoitusmenetelmiä, joista nykyään käytetyimpiä ovat muun muassa numeeriset menetelmät, mekaaniset mallit, ja empiiriset mallit. Jokaisella mitoitusmenetelmällä on omat hyvät ja huonot puolensa ja parhaiten käytettäväksi sopiva mitoitusmenetelmä riippuu liitoksen tyypistä, rakennemallista ja

käyttökohteesta. Diaz et al. tekemän hyvin kattavan mitoitusmenetelmiä vertailevan tutkimuksen [12] mukaan voidaan todeta, että monimutkaisten liitosten mitoittamiseen numeeriset mallit ovat hyvä vaihtoehto ja mekaaniset mallit toimivat hyvin laajasti tutkituille liitoksille, joiden toiminta saadaan kuvattua hyvällä tarkkuudella riittävällä määrällä komponentteja. Empiiristen mallien käyttö on lähinnä järkevää vain, kun vaaditaan liitoksen nopeaa mitoitusta ja liitoskonfiguraatio pysyy liitoksissa hyvin samanlaisena.

Numeeriset mallit pohjautuvat elementtimenetelmään (FEM), jolla liitos pystytään mallintamaan hyvin tarkasti. Numeerisilla malleilla liitoksesta pystytään saamaan paljon tietoa ja menetelmällä pystytään mitoittamaan kaikkia liitostyyppisiä. Numeerisilla menetelmillä pystytään saamaan myös laboratoriotestejä vastaavaa dataa, jolloin menetelmää voidaan käyttää muiden menetelmien muodostamiseen sekä verifiointiin. Numeeriset menetelmät vaativat kuitenkin yleensä käyttäjältä muita menetelmiä enemmän osaamista ja lisäksi esimerkiksi liitosten tarkasteleminen erillään rakenteesta voi olla hankalaa, sillä rakenteen toimintaa vastaavat reunaehdot ovat harvoin selkeät. Numeeriset menetelmät ovat yleensä myös muita menetelmiä selvästi hitaampia.

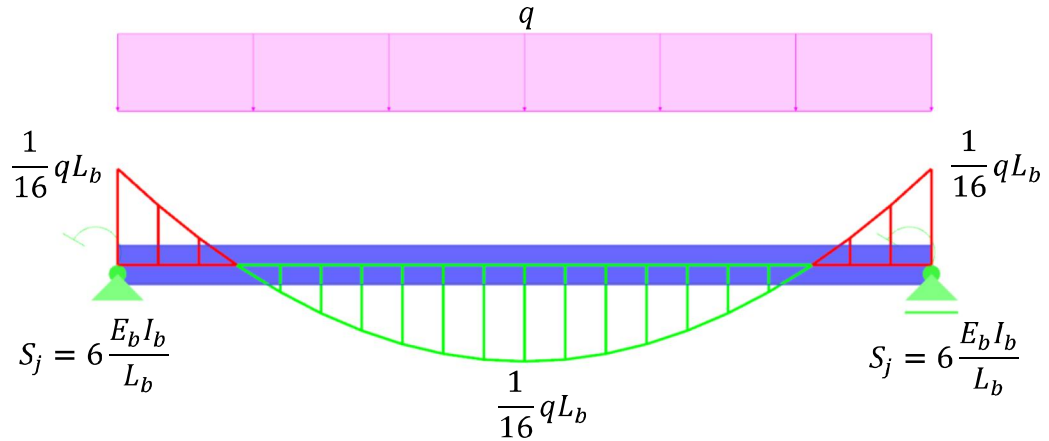
Mekaanisten mallien suurimmat vahvuudet ovat niiden tehokkuus ja monipuolisuus. Mitoituksen koostuminen liitoksen yksittäisistä komponenteista johtaa yleensä hyvin yleiskäyttöiseen mitoitukseen, jolloin samalla mallilla voidaan mitoittaa monenlaisia liitoksia. Menetelmän tarkkuus riippuu kuitenkin täysin liitoksen kuvaamisen komponenttien tarkkuudesta ja määrästä. Komponenttimenetelmä vaativat myös suunnittelijalta tarkempaa perehtymistä asiaan komponenttien suuren määrän takia. Tässä työssä käytetään standardin SFS EN 1993-1-8 [1] esittämää komponenttimenetelmää liitosmitoituksessa.

Empiiriset mallit muodostetaan aiemman testidatan avulla ja yksi empiiristen mallien huonoista puolista on juurikin vaatimus suuresta testidatamäärästä tarkkojen tulosten saamiseksi. Lisäksi empiirisiä malleja voidaan usein käyttää vain testidatan määräämän tietyn tyyppisen liitostyyppin mitoittamiseen. Hyvänä puolena empiirisissä malleissa on kuitenkin niiden nopeus ja helppokäyttöisyys. Yleisesti ottaen empiiriset mallit ovat muihin malleihin verrattuna yksinkertaisia käyttää ja eivät välttämättä vaadi yhtä vahvaa mitoitusmenetelmän tuntemusta käyttäjältä, kuin muut edellä esitetyt menetelmät.

2.2 Liitosjäykkyyden vaikutus rasituksiin

Liitosjäykkyydellä on selvä vaikutus rakenteen kuormitusten jakautumiseen ja siten myös liitoksiin aiheutuviin rasituksiin. Yksiaukkoisen palkin tapauksessa palkin liitosten kiertymäjäykkyyksien vaikutus nähdään selvästi palkin tukimomentin ja kenttämomentin arvoissa. Liitosjäykkyys yksiaukkoisen palkin tapauksessa saadaan määritettyä analyytisesti palkin taipuman differentiaaliyhtälön avulla. Kuvassa alla (Kuva 3) on esitettyä analyttisen tarkastelun mukainen yksiaukkoisen palkin rasitusten optimijakauma sekä tuki- ja kenttämomenttien rasitusten mukaan saatava optimi kiertymäjäykkyys. Palkin optimi momenttijakauma vastaa tilannetta, jossa palkin tukimomentti ja kenttämomentti

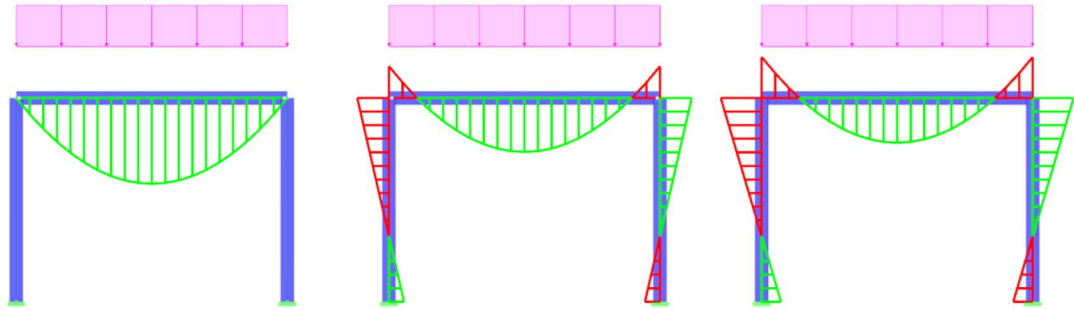
ovat yhtä suuret. Tämä saadaan liitoksen kiertymäjäykkyydellä $S_{j,opt} = 6 \frac{E_b I_b}{L_b}$ [4]. Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan kyseinen liitosjäykkyys luokitellaan osittain jäykäksi.



Kuva 3. Yksiaukkoisen palkin optimi momenttijakauma tasaisella kuormituksella. Liitosten optimi kiertymisjäykkyydet saadaan tilanteessa, jossa palkin kenttämomentti ja tukimomentit ovat yhtä suuret.

Momenttijakauma (Kuva 3), jossa tukimomentti ja kenttämomentti ovat yhtä suuret, johtaa Xu:n tekemän tutkimuksen [13] mukaan yksiaukkoisella palkilla palkin massan minimiin. Näin ollen jäykkien liitosten käyttö esimerkin tapauksessa on hyvä ratkaisu myös kustannusmielessä, sillä palkin kustannuksista suuri osa koostuu palkin materiaalikustannuksista. Pitkillä palkeilla palkin taipuma saattaa kuitenkin tulla määrääväksi ja tulee myös ottaa huomioon. Hitsatuilla palkeilla taipumaraja voidaan yleensä kiertää käyttämällä esikoroitusta [4], mutta standardikokoisilla palkeilla taipumaa voidaan joutua pienentämään liitosjäykkyyttä kasvattamalla, jolloin osittain jäykistä liitoksista ei välttämättä saada niin suurta hyötyä.

Tasokehien tilanteessa analyyttinen tarkastelu ei ole yhtä selkeä, sillä liitosjäykkyydet vaikuttavat myös pilarien nurjahduspituuksiin. Kuitenkin rasituskuvaajista voidaan selvästi nähdä liitosjäykkyyksien vaikutus rakenteen kuormitusten jakautumiseen. Kuvassa alla (Kuva 4) on esitettyä yksiaukkoisen kehä, jonka kuormituksena on palkkiin vaikuttava viivakuorma. Kuvassa on esitettyä myös kuormitusten jakautuminen rakenteessa eri palkki-pilari liitosten jäykkyyksillä.

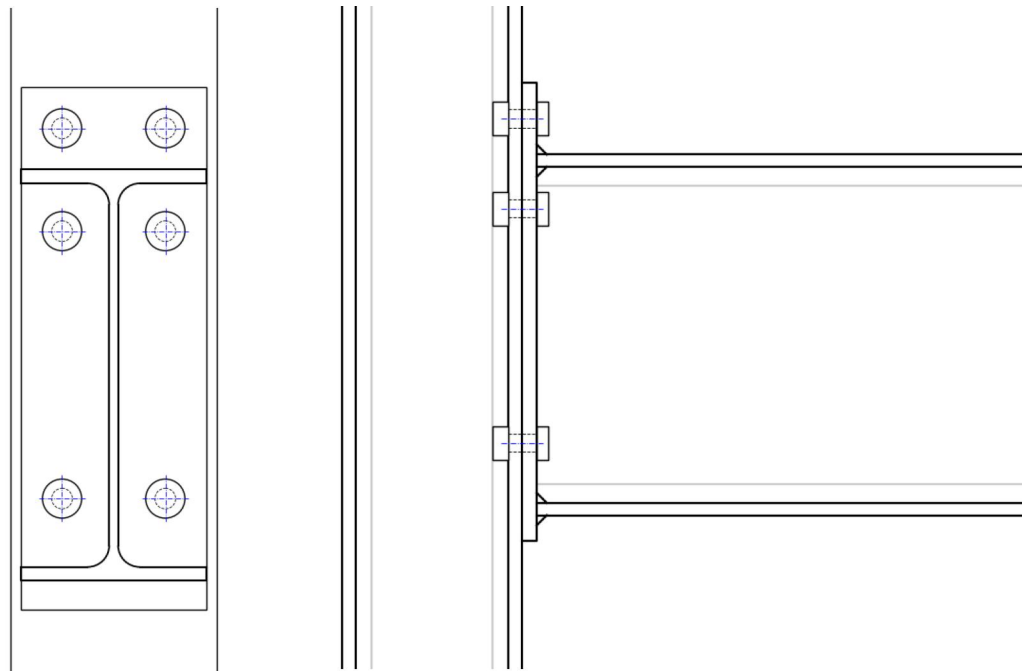


Kuva 4. Kehän liitosten jäykkyyden vaikutus kuormien jakautumiseen. Nivelellisillä liitoksilla (vas.) palkille tuleva kenttämomentti on suuri ja jäykkillä liitoksilla (oik.) pilarille siirtyvä momentti on suuri. Osittain jäykkillä liitoksilla (kesk.) kuormitukset saadaan jaettua rakenteessa tasaisemmin.

Nivelellisillä liitoksilla viivakuormasta aiheutuva momenttijakauma pysyy palkilla ja pilari kantaa vain normaalivoimaa. Tämä johtaa kuitenkin helposti suureen palkkikokoon palkin kenttämomentin ollessa suuri ja palkin taipumien kasvaessa. Lisäksi nivelellisillä liitoksilla ei saada lainkaan apua pilarien nurjahduspituuksiin. Täysin jäykillä ja osittain jäykkillä liitoksilla kuormitusten aiheuttamat momentit jakautuvat sekä palkille että pilareille ja liitoksilla pystytään vaikuttamaan myös pilarien nurjahduspituuksiin. Kuitenkin täysin jäykillä liitoksilla pilareille siirtyvät momentit ovat huomattavasti suuremmat, joka kasvattaa pilarien kokoa. Näin ollen optimi rakenteeseen, sekä rasitusten että kustannusten kannalta, päästään useimmissa rakenteissa käyttämällä osittain jäykkiä liitoksia kuten edellä esitetystä yksiaukkoisen palkin tapauksessa.

3. PÄÄTYLEVYLIITOSTEN SUUNNITTELU JA MITOITUS

Tässä työssä tarkasteltavat ruuveilla kiinnitetyt päätylevyliitokset koostuvat palkkiin hitsatusta päätylevystä ja ruuvikiinnityksestä pilarin laipan ja palkkiin hitsatun päätylevyn välillä. Päätylevyliitokset ovat monipuolisia ja päätylevyliitoksilla voidaan saada aikaiseksi sekä suuria momentteja siirtäviä liitoksia, että nivelellisiä liitoksia. Lisäksi päätylevyliitosten toimintaa on tutkittu paljon, joten päätylevyliitosten mitoitukseen löytyy paljon erilaisia mitoitusmenetelmiä. Tässä työssä käytetään standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] esitettyä komponenttimenetelmää, jonka avulla liitokselle saadaan määritettyä sekä momenttikestävyys että kiertymäjäykkyys. Kuvassa alla (Kuva 5) on esitettyä esimerkkikuva päätylevyliitoksesta.



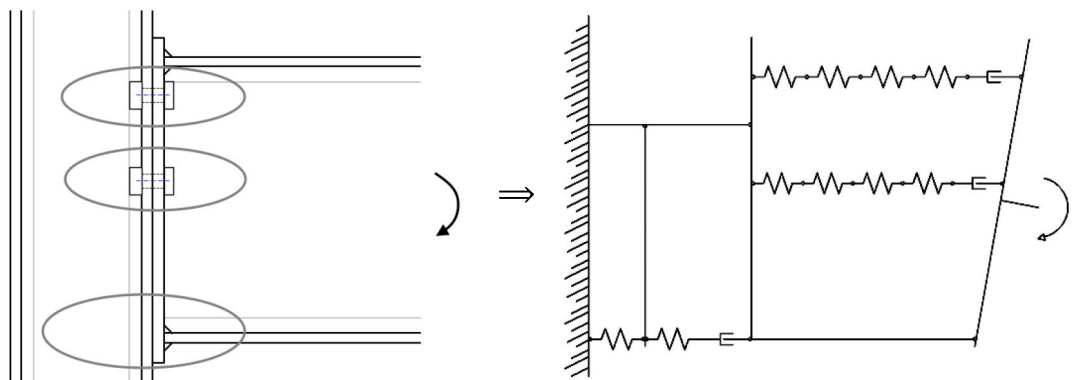
Kuva 5. Ylimenevä palkki-pilari päätylevyliitos.

3.1 Päätylevyliitosten mitoitus komponenttimenetelmällä

Päätylevyliitosten mitoitus H- ja I-profiilisten poikkileikkauksien välisissä liitoksissa tehdään tässä työssä käyttämällä standardin SFS EN 1993-1-8 mukaista komponenttimenetelmää [1], jossa liitoksen kiertymisjäykkyys ja kapasiteetti määritetään liitoksen peruskomponenttien kapasiteettien ja jäykkyyksien kautta. Standardissa SFS EN 1993-1-8 [1]

esitetty komponenttimenetelmä pohjautuu vahvasti 70-, 80- ja 90-luvulla tehtyihin tutkimuksiin päätylevyliitoksista, joissa muun muassa Zoetemeijer loi perustan päätylevyliitosten vetopuolen komponenttien esittämiseksi riittävällä tarkkuudella [14] käyttämällä määritykseen T-osaan perustuvaa mitoitusmenettelyä. Myöhemmin tutkimusta on tehty kattavasti lisää myös muiden liitostyyppien ja kuormitustapojen huomioimiseksi ja komponenttimenetelmän tulosten verifioimiseksi laboratoriokokein. Viime aikoina tutkimuskohteina päätylevyliitoksien ominaisuuksissa on muun muassa ollut liitoksen kiertymis-kyky ja liitoksen toiminta epälineaaraisella alueella [15][16].

Menetelmän hyvänä puolena on sen monipuolisuus, sillä eurokoodin mukaisella menetelmällä voidaan mitoittaa liitoksia hyvin erilaisiin tilanteisiin ja myös pilarien perustusliitosten sekä palkki-palkki liitosten mitoitus onnistuu. Komponenttimenetelmällä saadaan myös tietoa liitoksen murtomuodosta, joten liitos pystytään mitoittamaan sitkeäksi. Lisäksi komponenttimenetelmän monipuolisuus tuo edun mitoittamalla jokainen liitos tehokkaasti erikseen. Komponenttimenetelmän monipuolisuus voi kuitenkin myös olla sen suurin ongelma, sillä liitoslaskenta usealle erilaiselle liitokselle kyseisellä menetelmällä on työlästä ja liitoksen tiedoista riippuvia parametreja on paljon. Tämän takia komponenttimenetelmän käytöstä saadaan suurin hyöty irti koodaamalla standardin mukainen liitoslaskenta laskentapohjaksi, jota pystytään helposti käyttämään sekä liitoslaskentaan, että optimointiin.

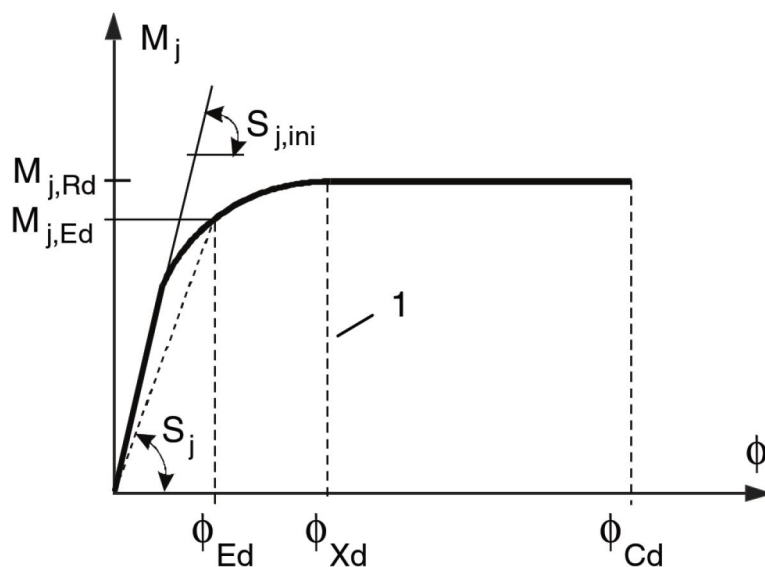


Kuva 6. Periaatekuva liitoksen jaosta peruskomponentteihin ja ekvivalentti joussimalli. Liitos jaetaan vetopuolen ja puristuspuolen komponentteihin ja jokaiselle peruskomponentille määritetään sekä kapasiteetti että jäykkyys. Liitoksen kokonaiskapasiteetti ja kiertymäjäykkyys koostetaan peruskomponenttien tietojen mukaan.

Päätylevyliitosten laskenta voidaan karkeasti jakaa kolmeen mitoituksen pääkohtaan: huomioon otettavien peruskomponenttien valitseminen, valittujen peruskomponenttien vasteen määrittäminen ja peruskomponenttien yhteisvaikutuksen määrittäminen. Kyseisistä kohdista ensimmäinen, huomioon otettavien peruskomponenttien valitseminen, on suunnittelijan itse määritettävissä ja valittavat peruskomponentit riippuvat liitoksen tiedoista. Standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] on esitettynä tiedot 20 eri peruskomponentin

laskennalle ja yleisesti ottaen liitoksen mitoitus tulisi ottaa huomioon kaikki mahdollisesti liitokseen vaikuttavat peruskomponentit. Standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] on myös hyväksytty myös muiden peruskomponenttien käyttäminen edellyttäen, että kyseisten peruskomponenttien ominaisuudet perustuvat standardin EN 1990 [17] mukaan tehtyihin kokeisiin ja kokeiden tukemiin analyttisiin ja numeerisiin menetelmiin. Tässä työssä tarkasteltaviin vahvistamattomien päätylevyliitosten mitoitus tulee ottaa huomioon 11 standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] esitetyistä peruskomponenteista liitoksen toiminnan kuvaamiseksi.

Peruskomponenttien vasteen määrittäminen tehdään sekä komponentin kapasiteetille, että jäykkyydelle ja liitoksen kokonaistoiminta muodostetaan komponenttien tiedoista. Liitoksen kestävyys lasketaan määräävimpiin peruskomponentteihin perustuen ja liitoksen kiertymäjäykkyys muodostetaan peruskomponenttien toiminnan kuvaavien ekvivalenttien jousien perusteella käyttäen jousien yhteen laskenta sääntöjä. Kapasiteetin määrittämisestä poiketen kiertymäjäykkyyteen otetaan huomioon kaikkien liitoksen toimintaan vaikuttavien peruskomponenttien vaikutus, joista saadaan koottua liitoksen toiminnan kuvaava momentti-kiertymäyhteys. Alla on esitettyä esimerkikuvaa liitoksen momentti-kiertymäkuvaajasta, joka saadaan standardin komponenttimenetelmän perusteella.



Kuva 7. Liitoksen momentti-kiertymäkuvaaja komponenttimenetelmän mukaan (SFS EN 1993-1-8 [1], kuva 6.1)

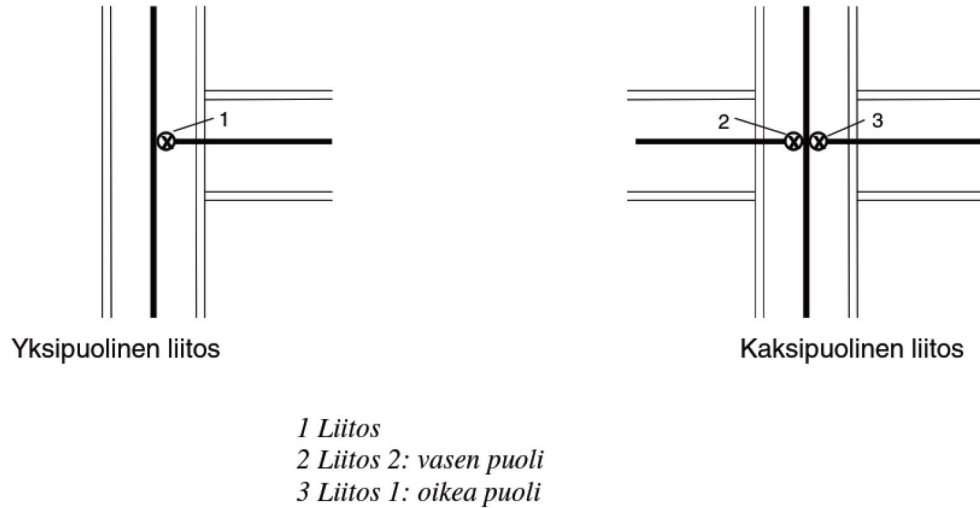
Standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] on esitettyä myös liitoksen toimintaa kuvaavat rajat liitoksen lujuudelle ja kiertymäjäykkyydelle, joiden mukaan liitoksen toiminta voidaan kuvata globaalissa laskentamallissa todellisuutta vastaavasti. Liitoksen mallinnustapa ja rajat riippuvat globaalien rakenteen tiedoista sekä globaalien rakenteen mallinnustavasta. Liitosluokitus on esitettyä tarkemmin kappaleessa 3.3. Luokituksella erilaiset liitokset pyritään saamaan idealisoitua siten, että liitostyypistä ja liitoksen tiedoista riippumatta liitoksen analyttisesti määritetyt ominaisuudet ovat konservatiivisia liitoksen todelliseen toimintaan nähden.

Kapasiteetin ja kiertymäjäykkyyden lisäksi liitoksen kiertymiskyky tulee olla riittävä liitoksen toimimiseksi suunnitellussa tilanteessa. Standardi SFS EN 1993-1-8 [1] ei nykyisellään komponenttimenetelmän puitteissa anna laskentamenetelmiä liitoksen kiertymiskyvyn määrittämiselle, mutta kiertymiskyvyn määrittäminen komponentteihin perustuen on kehitteillä [18]. Standardissa kiertymiskyvyn tarkastamiseen on annettu vain tilanteet, joissa liitoksen voidaan olettaa omaavan riittävä kiertymiskyky. Tapauksissa, joissa liitoksen kiertymiskykyä ei voida varmistaa, tulee kiertymiskyky varmistaa kokein standardin EN 1990 [17] liitteen D mukaan tai tarkoituksen mukaisten laskentamallien avulla edellyttäen, että myös kyseiset laskentamallit perustuvat standardiin EN 1990 [17] mukaisesti tehtyjen kokeiden tuloksiin. Epäselvissä tilanteissa liitoksen kiertymiskyky voidaan myös määrittää FEM-laskennalla, kunhan liitos mallinnetaan riittävällä tarkkuudella sekä liitoksen että rakenteen toiminnan kuvaamiseksi. Huomion arvoista on kuitenkin, että liitoksen kiertymiskyky tulee standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan tarkistaa vain, kun käytetään plastisuusteorian (plastinen tai kimmo-plastinen) mukaista analyysiä.

Standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] esitetyn komponenttimenetelmän käyttö palkki-pilari päätylevyliitosten liitosmitoitukseen on kuitenkin rajoitettu vain momenttia ja leikkausvoimaa kantaviin liitoksiin. Palkin normaalivoiman ylittäessä 5% palkin plastisesta normaalivoimakapasiteetista, liitoksen kapasiteetti voidaan mitoittaa standardissa esitetyn konservatiivisin oletuksin (kaava (12)). Normaalivoiman vaikutus kiertymäjäykkyyteen voidaan huomioida esimerkiksi lähteen [18] mukaan. Tässä työssä normaalivoiman vaikutus on kuitenkin jätetty huomioimatta ja vain pääasiallisesti momentin ja leikkausvoiman kuormittavia pilari-palkki liitoksia tarkastellaan.

3.2 Päätylevyliitosten mallinnus rakennemallissa

Palkki-pilari päätylevyliitoksilla liitosmallinnus voidaan standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan tehdä liittyvien sauvojen keskilinjojen mukaan ja erillisiä sekundaarimomenteja liitosepäkeskisyyksistä ei tarvitse huomioida (Kuva 8). Kaksipuolisen liitoksen yhteydessä liitos voidaan mallintaa rakennemallissa kahtena eri liitoksena, jotka vaikuttavat toisiinsa. Liitosmitoitusta tehdään molemmille puolille erikseen.



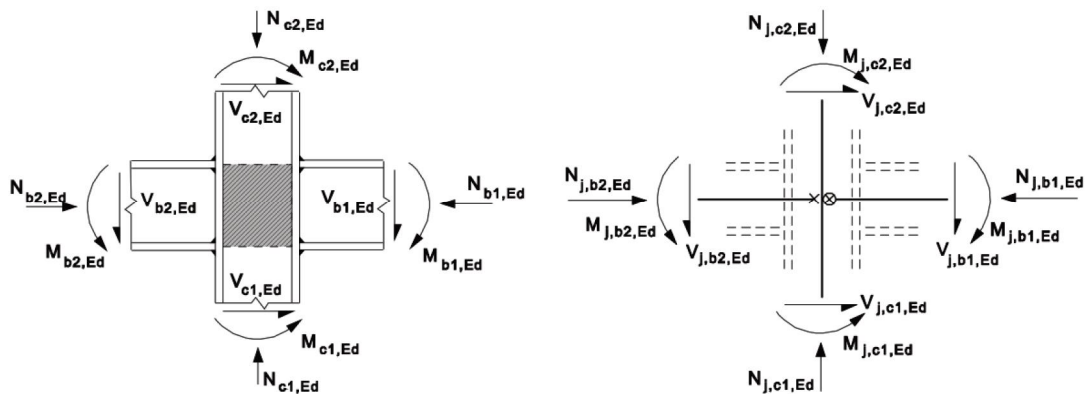
Kuva 8. Palkki-pilari liitoksen mallinnus standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan.

Liitokseen vaikuttavat rasitukset määritetään kaikkien liitosten sauvojen mukaan ja resultiivien kuormien vaikutus pilariin otetaan liitosmitoituksessa huomioon. Pilarin leikkausvoiman rasittaman uuman vaikutus on standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] otettu huomioon muunnosparametreilla, joilla liittyvien sauvojen ja pilari kuormien vaikutus uumaan vaikuttavaan leikkausvoimaan voidaan mallintaa liitosmitoituksessa (Kuva 9). Muunnosparametri voidaan määrittää standardin mukaan liitoksen kuormituksista kaavoilla

$$\beta_1 = \min \left(\left| 1 - \frac{M_{j.b2.Ed}}{M_{j.b1.Ed}} \right|, 2 \right) \quad (1)$$

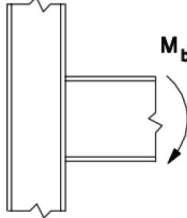
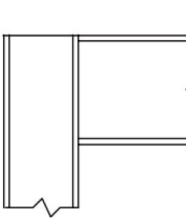
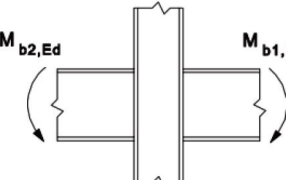
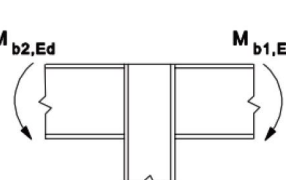
$$\beta_2 = \min \left(\left| 1 - \frac{M_{j.b1.Ed}}{M_{j.b2.Ed}} \right|, 2 \right) \quad (2)$$

joissa suunnittelukuormitukset $M_{j.b1.Ed}$ ja $M_{j.b2.Ed}$ ovat esitettyinä kuvassa alla (Kuva 9).



Kuva 9. Palkki-pilari liitokseen vaikuttavat kuormat (SFS EN 1993-1-8 [1], kuva 5.6)

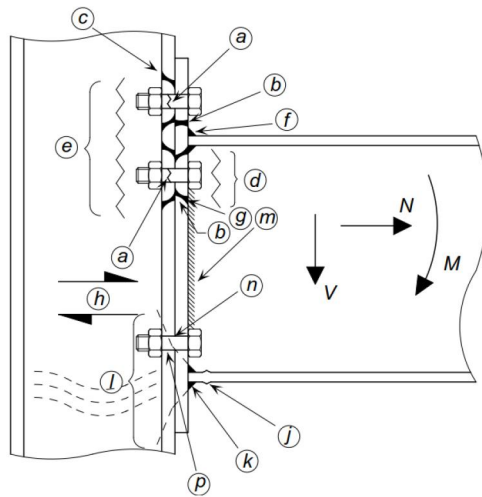
Standardissa on myös esitettyä muunnosparametrien β likimääräiset arvot, joita voidaan myös käyttää mitoituksessa. Likimääräiset arvot ovat esitettyinä taulukossa alla (Kuva 10).

Liitostyyppi	Vaikutus	β :n arvo
 	$M_{b1,Ed}$	$\beta \approx 1$
 	$M_{b1,Ed} = M_{b2,Ed}$ $M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} > 0$ $M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} < 0$ $M_{b1,Ed} + M_{b2,Ed} = 0$	$\beta = 0$ *) $\beta \approx 1$ $\beta \approx 2$ $\beta \approx 2$
*) Tässä tapauksessa β :n arvo on lähempänä tarkkaa arvoa kuin likiarvo.		

Kuva 10. Muunnosparametrien likimääräiset arvot (SFS EN 1993-1-8 [1], taulukko 5.4)

3.2.1 Peruskomponentit

Peruskomponentit voidaan jakaa karkeasti puristuspuolen komponentteihin ja vetopuolen komponentteihin sekä pystysuuntaisen leikkausvoiman kantaviin osiin. Pilari-palkki liitoksissa puristuspuolella toimivia komponentteja ovat pilarin uuma (leikkaus sekä puristus), palkin laipan hitsit sekä palkin laipan ja uuman puristus. Vetopuolen toimivia komponentteja ovat pilarin vedetty uuma, pilarin laipan taivutus, vedetyt ruuvit, päätylevyn taivutus, palkin vedetyn laipan sekä uuman hitsit ja palkin vedetty uuma. Pystysuuntaisen leikkauksen kantavia osia ovat liitoksen ruuvit (ruuvien leikkaus- ja reunapuristus) ja mahdollisesti leikkauksen kantamiseen suunniteltu leikkauspala sekä palkin uuman hitsit. Päätylevyn laskennassa käytetyt peruskomponentit ovat esitettyinä kuvassa alla (Kuva 11).

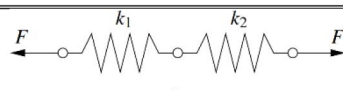
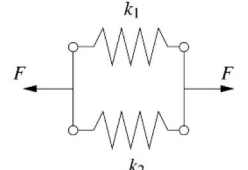


ZONE	REF	COMPONENT
TENSION	a	Bolt tension
	b	End plate bending
	c	Column flange bending
	d	Beam web tension
	e	Column web tension
	f	Flange to end plate weld
	g	Web to end plate weld
HORIZONTAL SHEAR	h	Column web panel shear
COMPRESSION	j	Beam flange compression
	k	Beam flange weld
	l	Column web
VERTICAL SHEAR	m	Web to end plate weld
	n	Bolt shear
	p	Bolt bearing (plate or flange)

Kuva 11. Pilari-palkki päätylevyliitoksen peruskomponentit ([9], sivu 6)

Koko liitoksen toiminta saadaan määritettyä peruskomponenttien yhteisvaikutuksesta komponenttien ominaisuuksien mukaan ja komponenttien ominaisuuksien yhdistelyssä otetaan huomioon, ovatko komponentit sarjassa vai rinnan. Kestävyyden määrittämisessä sarjassa olevien liitosten kokonaiskapasiteetti määritetään heikoimman sarjassa olevan peruskomponentin kapasiteetin mukaan ja rinnan olevien peruskomponenttien yhteisvaikutus summataan yhteen kokonaiskapasiteetin saamiseksi. Kiertymäjäykkyyden määrittämisessä peruskomponentit mallinnetaan jousina ja yhteisvaikutuksen määrittämisessä käytetään jousien yhteen laskenta periaatteita. Sarjassa ja rinnan olevien komponenttien periaatteelliset yhteen laskenta kaavat ovat esitettyinä taulukossa alla (15Taulukko 1).

Taulukko 1. Sarjaan ja rinnan kytkettyjen komponenttien yhteen laskenta periaatteet.

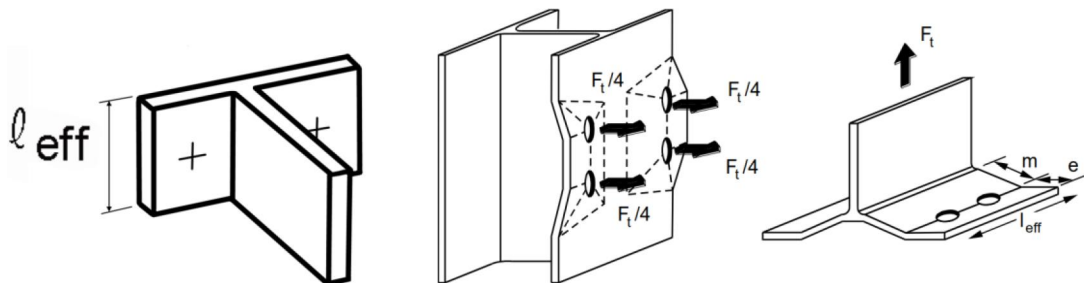
	Jäykkyys	Kapasiteetti
sarjassa 	$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$	$F_{Rd} = \min(F_{Rd.1}, F_{Rd.2})$
rinnan 	$k = k_1 + k_2$	$F_{Rd} = \min(2F_{Rd.1}, 2F_{Rd.2})$

Kaksipuolisen liitoksen tapauksessa peruskomponentit otetaan huomioon erikseen molemmilla puolilla liitosta ja liitoksen molemmille puolille saadaan erilliset momenttikapasiteetit ja kiertymäjäykkyydet. Ainoa puolten yhteinen peruskomponentti kaksipuolisessa pilari-palkki liitoksessa on pilarin uuman leikkaus. Pilarin uuman leikkaukseen tulee myös ottaa huomioon liitoksen toiminnasta aiheutuva leikkausvoima, kuten edellä kappaleessa 3.2 on esitetty. Peruskomponenttien kapasiteettien ja jäykkyyksien määrittämisessä käytettävät laskentakaavat ovat esitettyinä kappaleessa 3.6.

3.2.2 Ekvivalentti T-osa

Vedettyjen ruuvirivien peruskomponenttien kapasiteettien määrittämisessä käytetään ekvivalenttia T-osaa, jonka kapasiteetin sekä jäykkyyden määrittäminen perustuu myötöviivateoriaan. Pilarin laipan sekä päätylevyn taivutuskapasiteetit saadaan mallinnettua määräävintä myötömuotoa vastaavan T-osan efektiivisen leveyden kautta. Pilarin sekä palkin uuman kapasiteetit vedossa saadaan myös määritettyä T-osan efektiivisen leveyden kautta, kun vedetyn osan oletetaan olevan vedossa T-osan mukaiselta ekvivalenttiselta alueelta. Itse ruuvien kapasiteetti on otettuna huomioon T-osan murtumismalleissa, joissa huomioidaan myös ruuveihin tuleva vipuvaikutus.

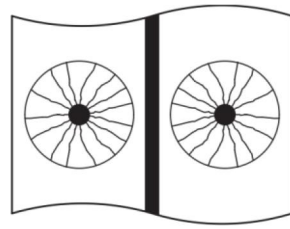
Tarkasteltaessa pelkästään taivutettua pilarin laippaa tai taivutettua päätylevyä, voidaan kapasiteetit määrittää myötöviivateoriaan perustuen. Tällöin vedettyjen ruuvirivien tiedot ja reunaetäisyydet sekä tarkasteltavan osan levyn paksuus määrittävät myötöviivan muodon. Kyseiset myötöviivat voidaan määrittää sekä ruuviriveille, että ruuviryhmille ja eri myötöviivoja vastaavat kapasiteetit voidaan esittää yksinkertaistettuna ekvivalentin T-osan efektiivisen leveyden avulla. Myötöviivoja vastaavat kapasiteetit saadaan mallinnettua T-osan efektiivisillä leveyksillä tehokkaasti ja yleisesti monelle eri myötötavoille. Määräävä myötömuoto saadaan helposti T-osan lyhimmän efektiivisen leveyden perusteella ja useita myötötapoja voidaan ottaa huomioon määrittämällä eri myötöviivojen efektiiviset leveydet. Kuvassa alla (Kuva 12) on esitettyä T-osan periaatekuva yhdelle vedetylle ruuviriville sekä kahden ruuvirivin muodostamalle ruuviryhmälle.



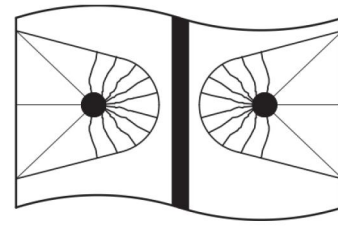
Kuva 12. T-osa periaatekuva. Vasemmalla yhden ruuvirivin T-osa ja oikealla ruuviryhmän T-osa. [19]

Perusideana T-osalla on esittää tiettyä myötöviivateorian mukaista myötötapaa vastaava kapasiteetti ekvivalentin T-osan materiaalin, laipan paksuuden ja efektiivisen leveyden mukaan. T-osan efektiivinen leveys on puhtaasti laskennallinen suure, eikä välttämättä suoraan vastaa murtomuodon fyysistä leveyttä. Todellinen murtomuodon myötöviiva on määritetty myötöviivateoriaan perustuen ja todellinen myötöviivan muoto sekä pituus riippuu tarkasteltavan ruuvirivin/-ryhmän tiedoista. Myötöviivan perustapaukset, pyöreä myötöviiva sekä ei-pyöreä myötöviiva ovat esitettyä kuvassa alla (Kuva 13) ja jokainen myötöviivatapaus on periaatteeltaan kyseisten myötömuotojen tapainen. Riippuen reu-

naetaisyyksistä uumaan, vapaaseen reunaan sekä vahvikkeisiin/palkin laippoihin standardissa on annettu eri myötöviivoja vastaavat efektiiviset teholliset leveydet, joiden mukaan määräävimman myötöviivan mukainen T-osan kapasiteetti saadaan laskettua.



$$l_{eff} = 2\pi m$$



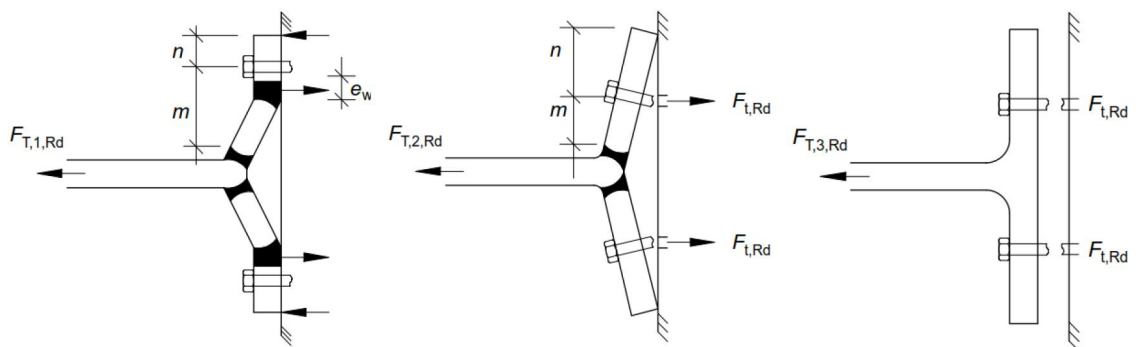
$$l_{eff} = 4m + 1.25e$$

Kuva 13. Myötömuotojen perustapaukset ja kyseisten perustapausten ekvivalentit T-osien efektiiviset leveydet, vasemmalla pyöreä myötömuoto ja oikealla ei-pyöreä myötöviiva. m =reunaetaisyys uumaan, e =reunaetaisyys vapaaseen reunaan ([9], sivu 6)

T-osan efektiivisten leveyksien lisäksi standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] T-osan murtomuodot on jaettu kolmeen murtumismalliin:

1. Täydellisen mekanismin syntyminen laipassa
2. Ruuvien murtuminen, kun laippa samalla myötää
3. Ruuvien murtuminen

, joiden kautta myös ruuvien kapasiteetti ja ruuveille mahdollisesti lisäkuormaa aiheuttava vipuvaikutus otetaan huomioon. Kyseisistä murtumismalleista muoto 1 on sitkeä, muoto 2 on osittain sitkeä ja muoto 3 on hauras. Mitoituksessa tulisi aina pyrkiä siihen, että murtomuoto 3 ei ole määräävä, sillä kyseisessä tapauksessa liitoksen muodonmuutoskyky (kiertymiskyky) ei välttämättä ole riittävän suuri hauraan murtomuodon estämiseksi.



Kuva 14. T-osan murtomuodot, vasemmalta; muoto 1: Täydellinen mekanismin syntyminen laipassa (vas.), muoto 2: Ruuvien murtuminen, kun laippa samalla myötää (kesk.), muoto 3: Ruuvien murtuminen (oik.) ([9], sivu 10)

Edellä (Kuva 14) esitetyille murtomuodoille on standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] esitetty eri ruuvien sijaintien mukaiset efektiiviset leveydet, joiden avulla T-osan vetokapasiteetti pystytään määrittämään. Kyseinen vetokapasiteetti vastaa ruuvirivin/-ryhmän kapasiteettia, jolloin vedettyjen ruuvirivien kestävyudet saadaan määritettyä suoraan käyttämällä T-osaa. Standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] eri myötömuotoja vastaavat T-osien efektiiviset leveydet ovat esitettyinä taulukoituina arvoina ja eri murtumismalleja vastaavat vetokapasiteetit saadaan alla esitettyjen kaavojen mukaan (Kuva 15).

	Vipuvoimia voi syntyä, jos $L_b \leq L_b^*$		Vipuvoimia ei synny
Murtumismalli 1	Menetelmä 1	Menetelmä 2 (vaihtoehtoinen menetelmä)	$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$
Taustalevyjä ei käytetä	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd}}{2mn - e_w(m+n)}$	
Käytetään taustalevyjä	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd} + 2M_{bp,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd} + 4nM_{bp,Rd}}{2mn - e_w(m+n)}$	
Murtumismalli 2	$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n\Sigma F_{t,Rd}}{m+n}$		
Murtumismalli 3	$F_{T,3,Rd} = \Sigma F_{t,Rd}$		

$$L_b^* = \frac{8,8m^3 A_s}{\Sigma \ell_{eff,1} t_f^3}$$

$F_{T,Rd}$ on laipan T-osan vetokestävyuden mitoitusarvo

Q on vipuvoima

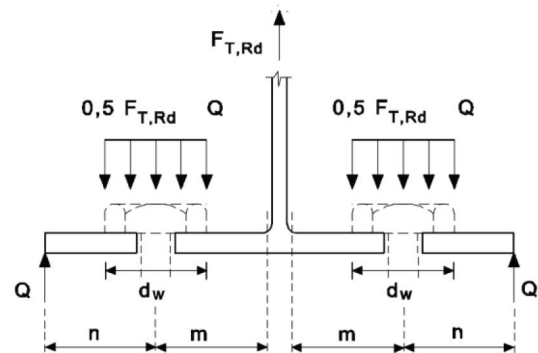
$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \Sigma \ell_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 \Sigma \ell_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$$

$$M_{bp,Rd} = 0,25 \Sigma \ell_{eff,1} t_{bp}^2 f_{y,bp} / \gamma_{M0}$$

$$n = e_{min} \quad \text{mutta} \quad n \leq 1,25m$$

$$e_w = d_w / 4$$



Kuva 15. T-osan murtumismallien 1-3 vetokapasiteetit. m ja n ovat reunaetäisyydet, e_{min} on pienin reunaetäisyys vapaaseen reunaan liitokseen vaikuttavan leikkausvoiman suunnassa, A_s on ruuvien jännityspinta-ala, $\ell_{eff,1}$ on pyöreän murtoviivan ekvivalentti T-osan efektiivinen leveys, $\ell_{eff,2}$ on ei-pyöreän murtoviivan ekvivalentti T-osan efektiivinen leveys, t_f on tarkasteltavan T-osan laipan paksuus (pilarin laippa tai päätylevy) ja t_{bp} on jäykistävän taustalevyn paksuus. (SFS EN 1993-1-8 [1], taulukko 6.2)

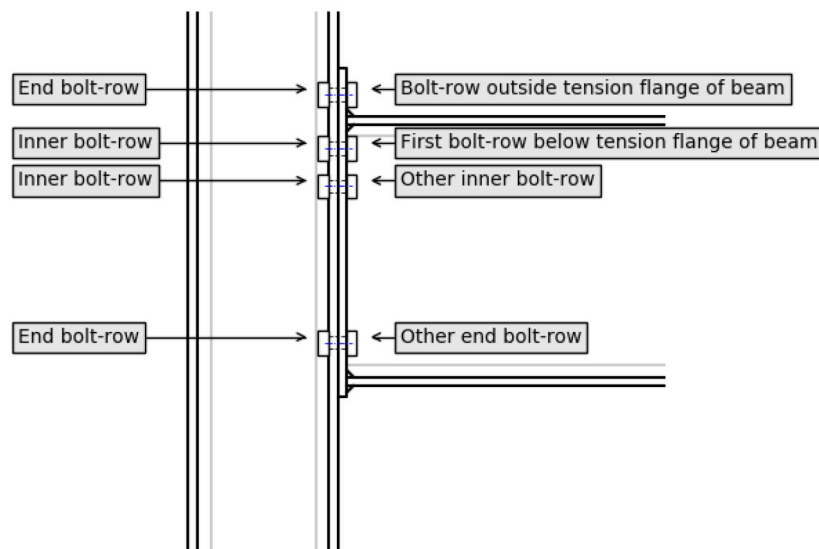
Standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] on esitettyinä T-osien laskentaan tiedot myös liitoksille, joissa on käytetty vahvisteita. Riippuen käytetyistä vahvisteista, vahvisteilla pystytään tuomaan lisää kapasiteettia pilarin uuman leikkauskestävyydelle, pilarin uuman puristuskestävyydelle, pilarin tai palkin uuman vetokestävyydelle tai pilarin laipan tai päätylevyn taivutukselle. Vahvistukset vaikuttavat samalla myös T-osien myötöviivoihin ja

siten ruuvirivien/-ryhmien kapasiteetteihin. Tässä työssä vahvistettujen liitosten tarkastelu on kuitenkin jätetty huomioimatta ja vahvistusten vaikutusten tarkastelu jätetään jatkotutkimuksissa tehtäväksi.

3.2.3 Ruuvirivit ja ruuvirivien ryhmät

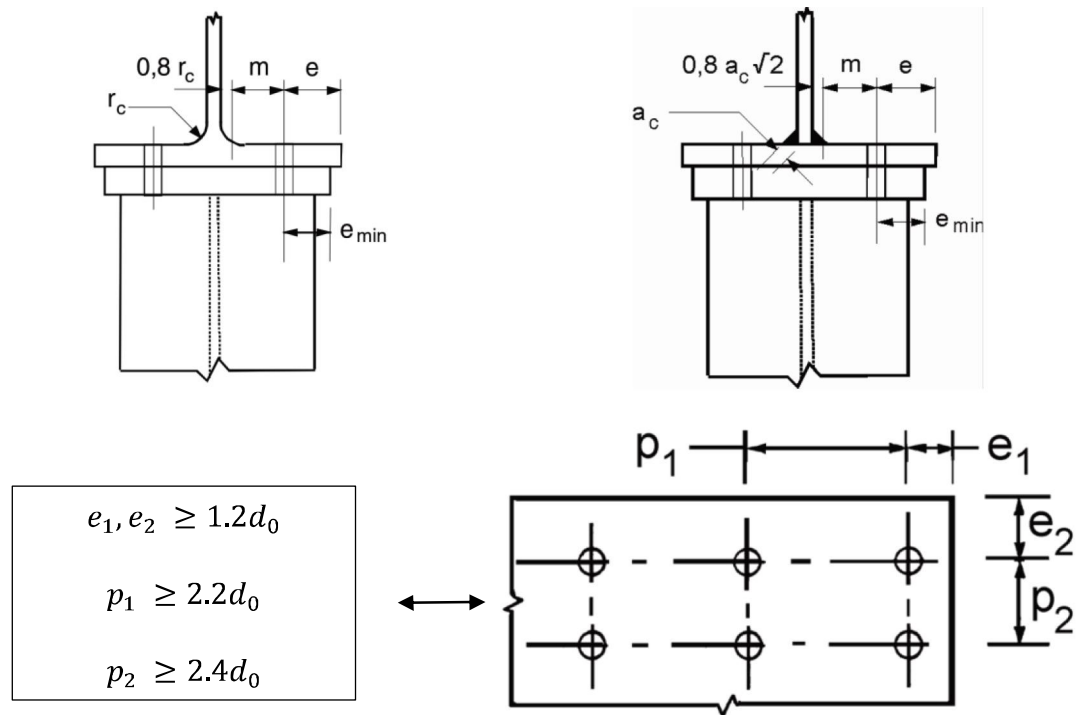
Kuten edellisessä kappaleessa on esitetty ruuvirivien sekä ruuviryhmien kapasiteetit saadaan määritettyä T-osan avulla ja T-osan määrittämiseen tarvittavat tiedot saadaan ruuvirivien tietojen mukaan. Jokainen vedetty ruuvirivi tarkastellaan erikseen sekä mahdollisesti ruuviryhmän osana ja ruuviriveille määritetään sekä kapasiteetti, että jäykkyys. Vain leikkausta kantaviksi oletetut ruuvirivit ja puristuspuolen mahdolliset ruuvirivit voidaan tarkastella vain kapasiteetin osalta ja niitä ei tarvitse ottaa standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan huomioon kiertymäjäykkyydessä. Vetopuolella olevat kaikki vedetyt ruuvirivit tarkastellaan myös ruuviryhminä ruuvirivien yhteisvaikutuksen vaikutuksen tarkistamiseksi.

Ruuvirivien tarkastelussa rivien sijainti ja reunaetäisyydet vaikuttavat huomattavasti rivien kapasiteettiin sekä jäykkyyteen ja vedettyjen ruuvirivien efektiiviset leveydet määritetään rivien sijaintien mukaan. Standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] T-osien efektiivisten leveysien määrittämiseen on taulukoituna myötöviivoja vastaavat efektiiviset leveydet sekä laipan, että päätylevylle taulukoissa 6.4, 6.5 ja 6.6. Kyseisissä taulukoissa ruuvirivien sijainnit ovat esitettyinä toisiin ruuviriveihin sekä mahdollisiin jäykistäviin osiin verrattuna. Kuva 16 on esitettyä esimerkki pilari-palkki liitoksen ruuvirivien sijaintien määrittämisestä, joiden mukaan taulukoista saadaan efektiiviset leveydet.



Kuva 16. Esimerkki ruuvirivien paikoista laipan ja päätylevyn puolella. Ruuvirivit sekä ruuvirivien ryhmät tarkastellaan pilarin ja palkin puolella erikseen.

Kuvassa alla (Kuva 17) on esitettyä standardin SFS EN 1993-1-8 [1] esittämät minimireunaetäisyydet sekä ruuvirivien väliset reunaetäisyydet.



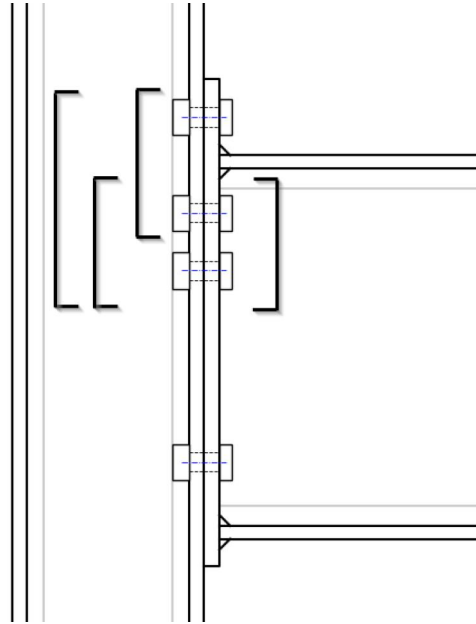
Kuva 17. Ruuvien reunaetäisyydet. Ylhäällä; m reunaetäisyys uumaan/laippaan ja e reunaetäisyys vapaaseen reunaan. Päätylevyliitoksissa e_{min} on pienin reunaetäisyys vapaaseen reunaan, joko pilarin laipassa tai päätylevyssä. Alhaalla reunaetäisyyksien sekä ruuvirivien välisten keskiöetäisyyksien raja-arvot. [1]

Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan liitoksen momenttikapasiteetin määrittämisessä voidaan mitkä tahansa vetopuolen ruuvirivit jättää huomioimatta, kunhan myös kaikki lähempänä puristuskeskiötä olevat ruuvirivit jätetään myös tarkastelussa huomioimatta. Kyseisellä menettelyllä ollaan mitoituksessa konservatiivisella puolella. Myös liitoksen kiertymäjäykkyyden laskennassa voidaan toimia samaan tapaan standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan. Lisäksi standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] on sallittu käyttää momenttikapasiteetin ja kiertymäjäykkyyden määrittämisessä eri määriä ruuvirivejä.

Ruuvirivit tarkastellaan myös ruuviryhmissä vaikuttavina, kuten edellä on mainittu. Ruuviryhmät muodostetaan ruuviriveistä pilarin laipan ja päätylevyn puolelle erikseen ja molemmat puolet tarkastellaan myös ruuviryhmien mukaan. Ruuviryhmät muodostetaan kaikille mahdollisille vetopuolen ruuviryhmäkonfiguraatioille pois lukien ruuviryhmät, joissa pätee jokin seuraavista ehdoista:

- Ruuviryhmä on laipan tai vahvikkeen halkaisema
- Ruuviryhmä, jossa hypätään yhden tai useamman ruuvirivin yli
- Ruuviryhmä, jossa on puristuksella olevia ruuvirivejä
- Ruuviryhmä, jossa on mukana vain leikkausvoimaa kantavia rivejä

Edellä esitetyn esimerkiliitoksen (Kuva 16) ruuviryhmät ovat esitettyinä alla (Kuva 18).



Kuva 18. Ruuviryhmien muodostaminen. Ruuviryhmät muodostetaan sekä laipan että päätylevyn puolelle erikseen ja ruuviryhmät muodostetaan kaikilla mahdollisilla ruuviryhmäkombinaatioilla. Päätylevyn puolella palkin vedetyn laipan eri puolilla olevat ruuvirivit eivät voi muodostaa ruuviryhmää. Esimerkikuvassa alin ruuvirivi on oletettu vain leikkausvoimaa kantavaksi.

Ruuviryhmien kapasiteetti muodostuu ruuviryhmää kuuluvien ruuvirivien kapasiteeteista, joissa otetaan huomioon ruuviryhmän vaikutus T-osan efektiivisiin leveyksiin. Ruuviryhminä tarkastelemisessa otetaan huomioon kaikki tilanteet, joissa ruuviryhmien kapasiteetti saattaa olla pienempi kuin sen muodostavien ruuvirivien yhteen laskettu kapasiteetti ja siten rajoittaa ryhmään kuuluvien yksittäisen ruuvirivin kapasiteettia.

Sekä ruuvirivien että ruuviryhmien kapasiteetit määritetään T-osien efektiivisten leveyksien mukaan. Kapasiteetiksi valitaan määräävin murtomuodoista (Kuva 15) alla olevan kaavan mukaisesti

$$F_{fc.Rd} = \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) \quad (3)$$

jossa $F_{T.1.Rd}$, $F_{T.1.Rd}$ ja $F_{T.1.Rd}$ vastaavat T-osan murtumismallien 1-3 kapasiteetteja. Kyseiset murtumismallien kapasiteetit saadaan laskettua kappaleessa 3.2.2 esitettyjen kaavojen mukaisesti käyttäen kuvan (Kuva 33) mukaisia efektiivisiä leveyksiä. Tilanteessa, jossa ruuveihin ei voi syntyä vipuvoimia, yksinkertaistuu laipan kapasiteetin laskenta kuvan (Kuva 15) kaavojen mukaisesti muotoon

$$F_{fc.Rd} = \min(F_{T.1-2.Rd}, F_{T.3.Rd}) \quad (4)$$

jossa $F_{T.1-2.Rd}$ vastaa murtumismallien 1 ja 2 kapasiteettia, jossa vipuvoimia ruuveille ei synny. Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan ruuveilla kiinnitetyissä pilari-palkki päätylevyliitoksissa voidaan kuitenkin aina olettaa syntyvän vipuvoimia.

Ruuviryhmien vaikutus ruuvirivien kapasiteettiin huomioidaan redusoidamalla ruuvirivien kapasiteetteja ruuviryhmien kapasiteettien mukaan. Jos ruuvirivien yhteenlaskettu kapasiteetti ylittää ruuvirivien muodostaman ruuviryhmän kapasiteetin, redusoidaan lähimpänä puristuskeskiötä olevien ruuvirivien kapasiteetteja, kunnes ruuvirivien yhteenlaskettu kapasiteetti ja ruuviryhmän kapasiteetti ovat tasapainossa. Esimerkiksi kolmen ruuvirivin muodostaman ruuviryhmän vaikutus huomioidaan seuraavasti

$$\begin{aligned} F_{t.Rd.1} &= \min(F_{t.Rd.1}, F_{t.Rd.group}) \geq 0 \\ F_{t.Rd.2} &= \min(F_{t.Rd.2}, F_{t.Rd.group} - F_{t.Rd.1}) \geq 0 \\ F_{t.Rd.3} &= \min(F_{t.Rd.3}, F_{t.Rd.group} - F_{t.Rd.1} - F_{t.Rd.2}) \geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

jossa $F_{t.Rd.i}$ on ruuvirivin i vetokapasiteetti ja $F_{t.Rd.group}$ on ruuvirivien muodostaman ruuviryhmän kapasiteetti. Ruuviriveistä 1 on kauimpana puristuskeskiötä ja ruuvirivi 3 on lähimpänä puristuskeskiötä.

Puristuspuolen kapasiteetin vaikutus ruuvirivien kapasiteetteihin huomioidaan samalla tavalla kuin ruuviryhmien vaikutus (kaava yllä), mutta verrattavana kapasiteettina käytetään puristuspuolen kapasiteettia $F_{comp.Rd}$ ja jokainen liitoksen momenttikapasiteetin määrittämisessä käytetty ruuvirivi otetaan huomioon. Puristuspuolen kapasiteetti määritetään seuraavasti

$$F_{comp.Rd} = \min\left(\frac{V_{wp.Ed}}{\beta}, F_{c.wc.Rd}, F_{c.fb.Rd}\right) \quad (6)$$

jossa $V_{wp.Ed}$ on pilariin uuman leikkauksen kapasiteetti, $F_{c.wc.Rd}$ on pilarin uuman kapasiteetti poikittaisessa puristuksessa ja $F_{c.fb.Rd}$ on palkin uuman ja laipan kapasiteetti puristuksessa. Kyseisten peruskomponenttien määrittäminen on esitetty kappaleessa 3.6. Muunnosparametri β ottaa huomioon pilarin uuman leikkauksen ja sen määrittäminen on esitetty edellä kappaleessa 3.2.

Näiden lisäksi standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] on vielä esitetty rajoitusehto ruuvirivien välisille kapasiteeteille, jolla varmistetaan, että ruuvien kapasiteetti (murtumismalli 3) ei määrää ruuvirivien kapasiteetteja ensimmäistä ruuviriviä lukuun ottamatta. Rajoitusedolla alempien ruuvirivien kapasiteetit rajataan elastiseen jakaumaan, jos ylempänä olevan ruuvirivin kapasiteetti määräytyy ruuvien vetokapasiteettien mukaan. Rajoitus tehdään alla olevan kaavan mukaan. Ruuvirivin r kapasiteetti rajataan arvoon

$$F_{t.Rd.r} \leq F_{t.Rd.x} \frac{h_r}{h_x} \quad (7)$$

jos jonkin kauempana puristuskeskiöstä olevan ruuvirivin x kapasiteetti $F_{t.Rd.x}$ ylittää arvon $1.9F_{t.Rd}$. Kaavassa $F_{t.Rd.x}$ ja h_x ovat minkä tahansa tarkasteltavan ruuvirivin r yläpuolella olevan ruuvirivin vetokapasiteetti ja etäisyys puristuskeskiöstä, $F_{t.Rd.r}$ ja h_r ovat

tarkasteltavan ruuvirivin vetokapasiteetti ja etäisyys puristuskeskiöstä. $F_{t,Rd}$ on yhden ruuvin vetokestävyys kaavan (43) mukaan määritettynä.

Vedettyjen ruuvirivien jäykkyyksien määrittäminen tehdään T-osien mukaisten efektiivisten leveyksien mukaan. Ruuviryhmien vaikutus ruuvirivien jäykkyyksiin otetaan huomioon käyttämällä ruuvirivien jäykkyyksien määrittämisessä ruuvirivin pienintä ruuvirivin efektiivistä leveyttä, joko yksittäisenä ruuvirivinä tai ruuviryhmän osana tarkasteltuna.

3.3 Liitosluokitus

Komponenttimenetelmässä liitos jaetaan pilarin, palkin ja päätylevyn omiin komponentteihin ja liitos luokitellaan mitoituksessa käytetystä laskentatavasta riippuen joko liitoksen momenttikestävyuden tai jäykkyyden mukaan. Luokituksen mukaan liitokselle saadaan määritettyä momentti-kiertymä yhteys, jota voidaan käyttää kokonaistarkastelussa. Liitoksen kiertymäjäykkyys on jaettuna kolmeen eri osaan, täysin jäykkä, osittain jäykkä ja nimellisesti nivelellinen, joista osittain jäykkien liitosten yhteydessä liitoksen todellista kiertymäjäykkyyttä tulee käyttää rakennemallissa. Täysin jäykkien liitoksen voidaan olettaa omaavan riittävä kiertymisjäykkyys, jotta rakennetta voidaan pitää jatkuvana. Nivelellisten liitosten voidaan olettaa toimivan kuormien siirrossa ottamatta momentteja vastaan. Taulukossa alla on esitetty kokonaisanalyysimenetelmien mukaiset liitosluokitukset (Taulukko 2).

Taulukko 2. Rakenteen analyysimenetelmän määräämä liitosluokitus

	Liitosluokitus			Liitosluokituksen määrä
Kimmoteoria	Nimellisesti nivelellinen	Osittain jäykkä	Jäykkä	Jäykkyys
Ideaaliplastinen	Nimellisesti nivelellinen	Osittain luja	Luja	Lujuus
Kimmo-plastinen	Nimellisesti nivelellinen	Osittain jäykkä ja osittain luja tai osittain jäykkä ja luja	Jäykkä ja osittain luja tai jäykkä ja luja	Jäykkyys sekä lujuus
Liitos rakenne-mallissa	Nivelellinen	Osittain jäykkä	Jäykkä	

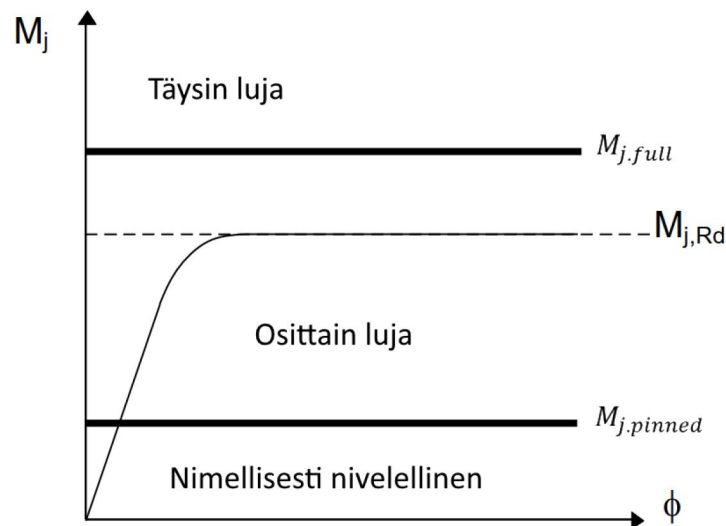
Liitoksen lujuusrajojen määrittäminen standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] perustuu liittyvien sauvojen lujuuksiin. Liitos voidaan olettaa olevan täysin luja, jos liitoksen kapasiteetti on suurempi kuin liittyvien sauvojen plastiset kapasiteetit. Täysin luja liitos mahdollistaa plastisten nivelten syntymisen liitokseen liittyviin sauvoihin ennen liitoksen pettämistä. Nimellisesti nivelellisen liitoksen rajaksi standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] on annettu 0.25 kertaa täysin lujan liitoksen kapasiteetti. Liitoksen kapasiteetin ollessa tämän alle, voidaan liitoksen olettaa siirtävän sisäiset voimat ilman merkittäviä momentteja. Osittain

lujiksi liitoksiksi luetaan kaikki muut liitokset, jotka eivät toteuta täysin lujan tai nimellisesti nivelellisen liitoksen rajoja. Nimellisesti nivelellisten sekä osittain lujien liitosten yhteydessä tulee myös varmistaa liitoksen kiertymiskyky. Standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] kiertymiskyvyn tarkistukseen on annettu vain rajoitukset, milloin liitoksella voidaan olettaa olevan riittävä kiertymiskyky, mutta liitoksen maksimi kiertymälle ei esitetä arvoja. Tutkimuksia liitoksen kiertymiskyvyn tarkempaan määrittämiseen on kuitenkin meillä [18]. Liitoksen lujuusrajat voidaan määrittää kaavoilla

$$M_{j,full} = \begin{cases} \max(M_{b,pl,Rd}, M_{c,pl,Rd}) & \text{Pilarin yläpää} \\ \max(M_{b,pl,Rd}, 2M_{c,pl,Rd}) & \text{Liitos pilarin päiden välillä} \end{cases} \quad (8)$$

$$M_{j,pinned} = 0.25M_{j,full} \quad (9)$$

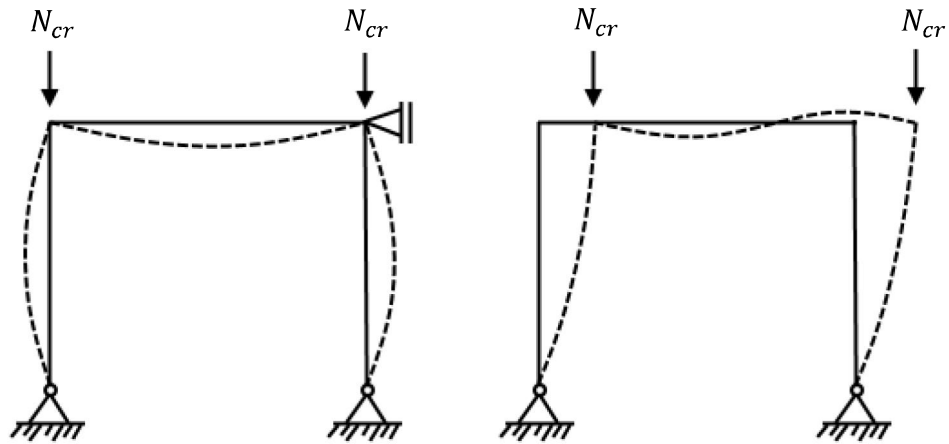
joissa $M_{b,pl,Rd}$ on liittyvän palkin plastinen kapasiteetti ja $M_{c,pl,Rd}$ on pilarin plastinen kapasiteetti. Liitoksen lujuuden määrittämisen raja-arvot ovat esitettyinä kuvassa alla (Kuva 19).



Kuva 19. Liitoksen luokitus lujuuden perusteella. Kuvassa esitettynä esimerkki täysin lujan ja nimellisesti nivelellisen liitoksen raja-arvoista ja liitoksen laskennallisen kapasiteetin arvosta.

Standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] liitosluokitus jäykyyden mukaan perustuu yksinkertaisen tasokehän nurjahduskuorman muutokseen palkki-pilari liitoksen jäykkyyden muuttuessa [20][21]. Kuvassa alla (Kuva 20) on esitettynä palkki-pilari liitosten jäykkyyden määrittämisessä käytetyn kehän periaatekuva. Pilarin perustusliitokset ovat nivelelliset ja kuormituksena oletetaan olevan vain normaalivoima pilarilla. Sivusiirtävässä kehässä kehä pääsee vapaasti siirtymään sivulle ja kehän jäykistys muodostuu suoraan palkki-pilari liitoksen jäykkyyden mukaan. Sivusiirtävässä kehässä pilarin nurjahdusmuoto tulee koko kehän siirtymisestä sivulle. Sivusiirtymättömissä kehissä kehän jäykistys on

hoidettu muilla rakenteilla ja liitosjäykkyys vaikuttaa periaatteessa vain kuormitusten jakautumiseen ja pilarien nurjahduspituuksiin. Sivusiirtymättömässä kehässä pilarien nurjahdusmuoto vastaa nivelellisesti päistään tuetun sauvan alinta nurjahdusmuotoa.



Kuva 20. Liitosjäykkyyksien rajojen määrittämisessä käytetty rakennemalli. Sivusiirtymättömässä kehässä jäykistys on hoidettu erillisillä jäykistävillä rakenteilla. Sivusiirtyvässä rakenteessa kehän jäykistys muodostuu liitosten jäykkyyksistä, joten täysin jäykän liitoksen raja-arvo on suurempi.

Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] esittämät kiertymäjäykkyyksirajat palkki-pilari liitoksille ovat esitettyinä alla

$$1: \text{Jäykkä, jos } S_{j.ini} \geq k_b \frac{E_b I_b}{L_b} \quad (10)$$

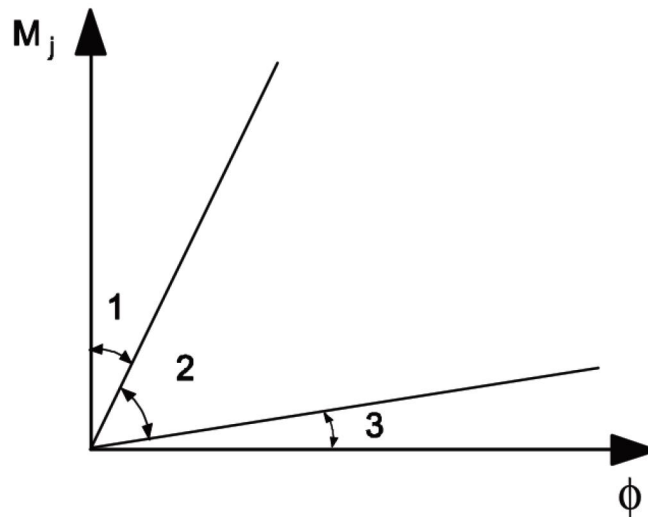
- Sivusiirtymätön rakenne: $k_b = 8$
 - Jäykistysjärjestelmä pienentää rakenteen sivusiirtymiä vähintään 80%
- Sivusiirtyvä rakenne: $k_b = 25$
 - Jos $\frac{I_b/L_b}{I_c/L_c} < 0.1$ lasketaan liitos osittain jäykäksi

2: Osittain jäykkä liitos, jos liitos ei täytä jäykän tai nivelellisen liitoksen rajoitus-ehtoja

- Myös jäykät ja nivelelliset liitokset voidaan tarkastella osittain jäykkinä

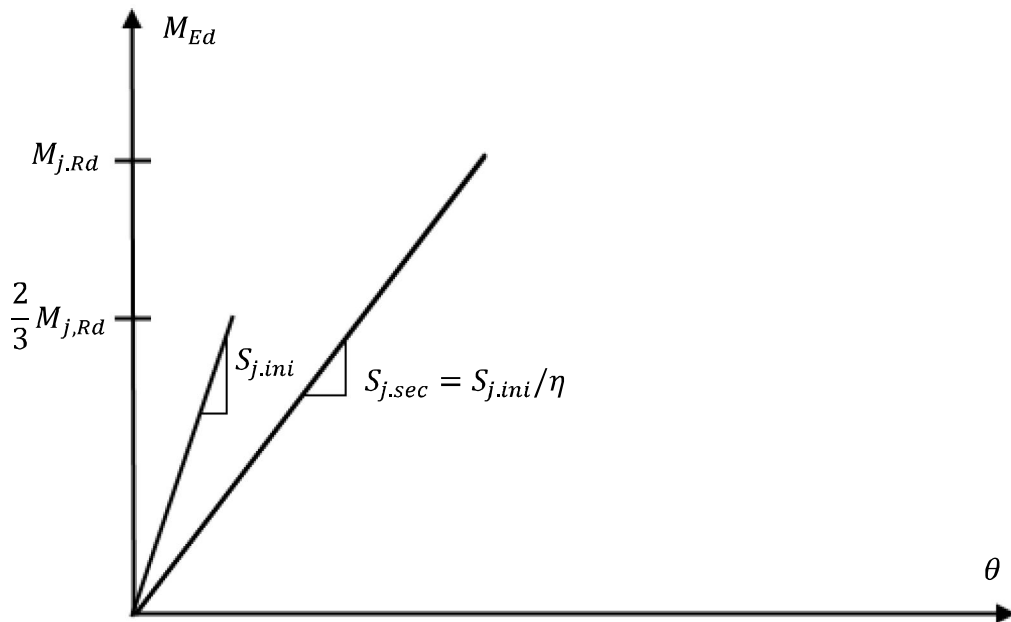
$$3: \text{Nivel, jos } S_{j.ini} \leq 0.5 \frac{E_b I_b}{L_b}$$

jossa E_b on palkin kimmokerroin, I_b ja I_c ovat palkin ja pilarin neliömomentit vahvemman suuntaan, L_b on palkin pituus ja L_c on pilarin kerroskorkeus. Kuvassa alla (Kuva 21) on esitettyinä selventävä kuva jäykkyysrajoista.



Kuva 21. Liitosluokituksen jäykkysrajat. Alue 1 vastaa jäykkää liitosta, alue 2 vastaa osittain jäykkää liitosta ja alue 3 vastaa nivelellistä liitosta. (SFS EN 1993-1-8 [1], kuva 5.4)

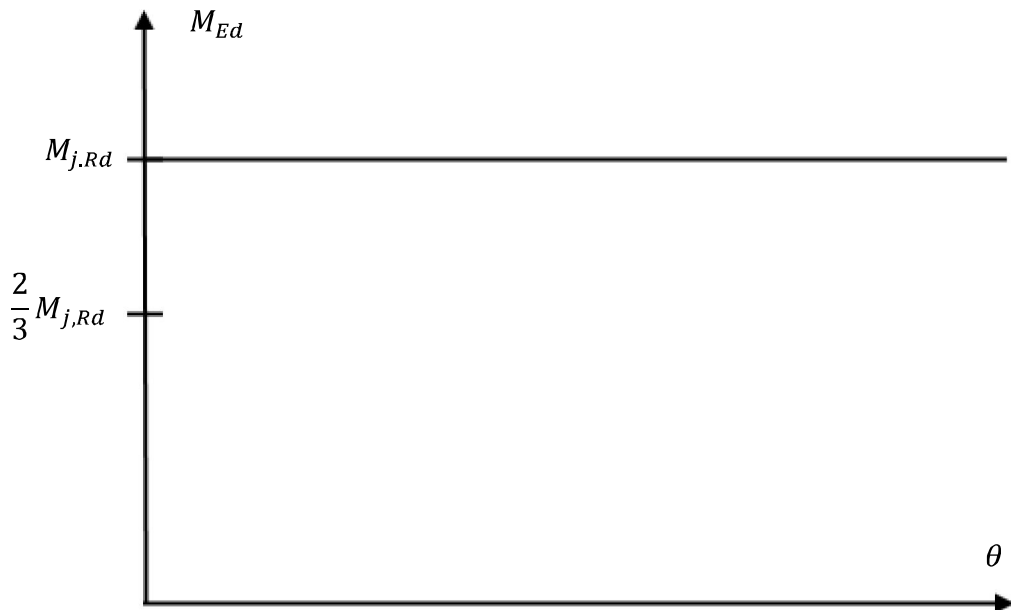
Kimmoteorian mukaisessa kokonaistarkastelussa liitokset luokitellaan niiden kiertymisjäykkyyden perusteella ja momentti-kiertymä yhteydessä huomioidaan palkin kuormitus. Kokonaistarkastelussa liitosten kiertymäjäykkyys huomioidaan liitoskapasiteettiin saakka, mutta plastinen käyttäytyminen jätetään tarkastelun ulkopuolelle, kuten kuvassa alla on esitetty (Kuva 22). Näin ollen tarkastelussa liitosmallinnuksessa tulisi ottaa huomioon liitoksen toiminta vain liitosmitoituksen mukaiseen kapasiteetin ääriarvoon saakka, jotta plastisoitumisesta johtuvaa kuormien jakautuminen ei pääse tapahtumaan. Liitosten kiertymäjäykkyys voidaan huomioida kimmoisella alueella alkujäykkyyden mukaan, kun liitoksen mitoitusmomentti on alle $2/3$ liitoksen kapasiteetista. Mitoitusmomentin ylittäessä $2/3$ liitoksen kapasiteetista tulee kiertymäjäykkyytenä käyttää sekantti-jäykkyyttä. Liitosjäykkyyden laskenta on esitettyinä kappaleessa 3.5.



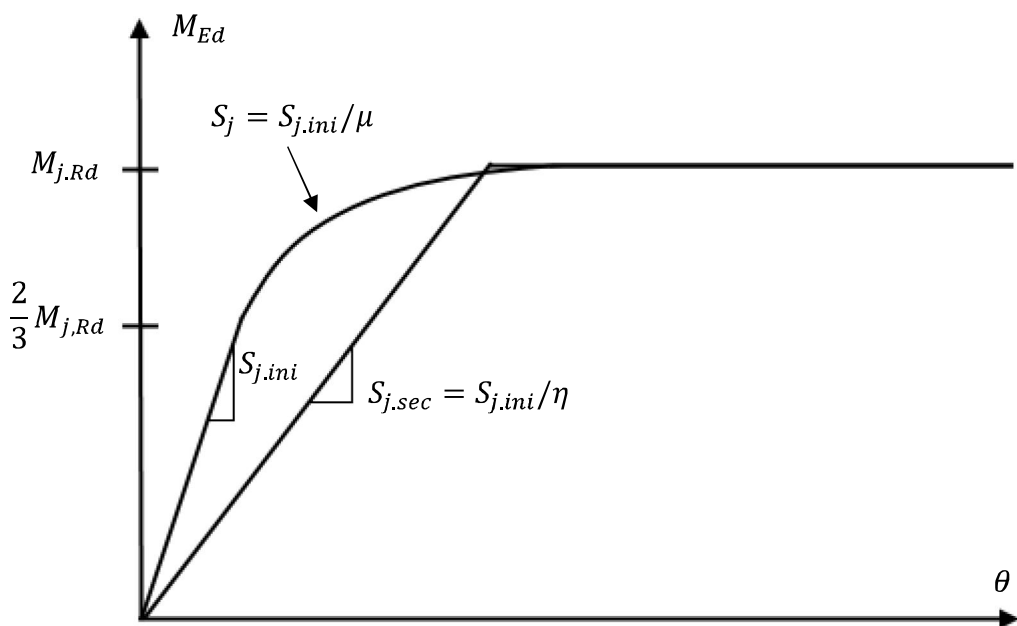
Kuva 22. Kimmoteorian mukaista kokonaisanalyysiä käytettäessä liitoksen luokitellaan kiertymäjäykkyyksien mukaan ja liitosten momentti-kiertymäyhteys voidaan mallintaa liitoksen kapasiteetin saavuttamiseen saakka. Jos liitokseen vaikuttava momentti on alle $2/3$ liitoksen kapasiteetista, voidaan liitoksen kiertymäjäykkyytenä käyttää alkujäykkyyttä. Mitoitusmomentin ylittäessä kyseisen rajan, tulee liitoksen kiertymäjäykkyys mallintaa sekanttijäykkyyden avulla, joka saadaan ruuveilla kiinnitetyillä päätylevyliitoksilla muunnoskerroin $\eta = 2$. Huomion arvoista on, että sekanttijäykkyyden käyttö on sallittua kaikilla kuormituksilla.

Plastisuusteorian (jäykkä-plastinen) mukaisen kokonaistarkastelun mukaan mitoitettaessa liitokset luokitellaan niiden lujuuden mukaan ja liitosten kiertymiskyky tulee tarkistaa. Standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] kiertymiskyvyn määrittäminen perustuu oletukseen, että liitoksella on riittävä kiertymiskyky, kun liitoksen murtomuoto on sitkeä. Plastisuusteorian mukaista kokonaistarkastelua käytettäessä liitosten sitkeä murtomuoto tulee varmistaa, sillä hauraalla murtomuodolla liitokset saattavat menettää kapasiteettinsa ennen kuin plastinen nivel pääsee syntymään liittyviin rakenneosiin. Kuvassa alla on esitetty liitosten momentti-kiertymä yhteys plastisuusteorian mukaista kokonaisanalyysiä käytettäessä (Kuva 23).

Kimmo-plastista kokonaistarkastelua käytettäessä liitoksien luokituksessa tulee ottaa huomioon sekä jäykkyys että lujuus, jolloin liitoksen täydellinen momentti-kiertymä yhteys mallinnetaan (Kuva 24). Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan liitoksen toiminta voidaan mallintaa joko bi-lineaarisenä käyttäen kimmoisella osalla sekanttikiertymäjäykkyyttä tai huomioida liitoksen plastisesta muodonmuutoksesta aiheutuva epälineaarinen osuus standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] esitettyllä jäykkyysuhteella



Kuva 23. Plastisuusteorian mukaista kokonaisanalyysiä käytettäessä liitokset luokitellaan niiden lujuuksien mukaan ja kiertymäjäykkyyttä ei tarvitse huomioida. Liitosten kiertymiskyky tulee kuitenkin varmistaa käytettäessä plastisuusteorian mukaista kokonaisanalyysiä.



Kuva 24. Kimmo-plastista kokonaisanalyysiä käytettäessä liitosten momentti-kiertymäyhteys mallinnetaan sekä kimmoisella että plastisella alueella. kiertymäjäykkyys voidaan mallintaa tarkasti käyttäen kaavassa (18) esitettyä jäykkyys-suhdetta μ tai konservatiivisesti käyttämällä liitoksen sekanttijäykkyyttä, joka saadaan ruuveilla kiinnitetyillä päätylevyliitoksilla muunnoskerroimen arvolla $\eta = 2$.

3.4 Momenttikestävyys

Päätylevyliitoksen mitoituksessa standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan momenttikapasiteetti sekä kiertymäjäykkyys muodostetaan peruskomponenttien mukaan ja liitoksen leikkauskestävyys hoidetaan joko ruuvien leikkauksella tai leikkauksen kantamiseen suunnitellulla leikkauspalalla. Liitoksen momenttikapasiteettiin otetaan huomioon sekä vedetyt ruuvirivit, että puristuspuolen kapasiteetti. Puristuspuolen ja ruuviryhmien vaikutus sekä ruuvien hauras murto muoto huomioidaan vedettyjen ruuvirivien kapasiteeteissa kappaleessa 3.2.3 esitetyn mukaisesti redusoimalla lähimpänä puristuskeskiötä olevien ruuvirivien kapasiteetteja. Tämän redusoinnin jälkeen koko liitoksen momenttikapasiteetti voidaan määrittää suoraan vedettyjen ruuvirivien tietojen mukaan.

Ruuveilla kiinnitettyssä pilari-palkki liitoksissa momenttikapasiteetti vahvempaan suuntaan saadaan standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan laskettua suoraan vedettyjen ruuvirivien vetokapasiteettien ja momenttivarsien avulla summaamalla kaikkien ruuvirivien kapasiteetit yhteen alla olevan kaavan mukaisesti

$$M_{j,Rd} = \sum_r F_{tr,Rd} h_r \quad (11)$$

jossa $F_{tr,Rd}$ on ruuvirivin r kapasiteetti ja h_r on ruuvirivin r etäisyys puristuskeskiöstä. Puristuskeskiö oletetaan pilari-palkki liitoksessa olevan puristetun palkin uuman keskellä, kun palkin normaalivoima on maksimissaan 5% palkin plastisesta normaalivoimakapasiteetista $N_{b,pl,Rd}$. Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan normaalivoiman ylittäessä annetun 5% raja-arvon, voidaan liitoksen kapasiteetti kuitenkin määrittää alla olevan kaavan mukaisella varmallalla puolella olevalla menetelmällä

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} + \frac{N_{j,Ed}}{N_{j,Rd}} \leq 1.0 \quad (12)$$

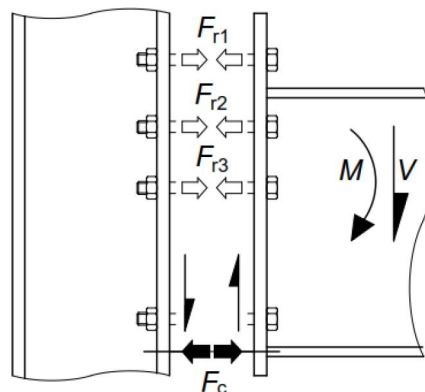
jossa $M_{j,Ed}$ ja $N_{j,Ed}$ ovat liitokseen vaikuttava taivutusmomentti ja normaalivoima. $M_{j,Rd}$ on liitoksen momenttikapasiteetti, kun liitoksen normaalivoimaa ei huomioida ja $N_{j,Rd}$ on liitoksen normaalivoimakapasiteetti, kun liitoksen momenttikapasiteettia ei huomioida. Tarkempi normaalivoiman huomioon ottaminen on esitetty lähteessä [18].

Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] esittämä momenttikapasiteetti (11) on liitoksen vahvempaan suuntaan (palkin vahvempi suunta taivutuksen suhteen) ja standardi SFS EN 1993-1-8 [1] ei ota kantaa heikomman suunnan momenttikapasiteettiin. Tilanteessa, jossa heikomman suunnan momentti on merkittävä, tulee liitoksen kapasiteetti kuitenkin määrittää myös kyseisen kuormituksen suhteen. Liitoksen heikomman suunnan momenttikapasiteetin määrittämiseen Eurokoodissa ei ole esitetty menetelmää, joten sen tarkastelu on jätetty tässä työssä huomioimatta.

Pilarin pohjalevy liitoksissa myös normaalivoiman vaikutus otetaan momenttikapasiteettiin ja puristuskeskiöön huomioon, mutta pilarien perustusliitokset jätetään tämän työn ulkopuolelle. Palkki-palkki jatkosliitosten momenttikapasiteetti määritetään samalla tavalla kuin pilari-palkki liitosten olettaen, että normaalivoimalle annettu raja-arvo pätee. Myös palkki-palkki liitoksessa puristuskeskiön paikkana voidaan pitää puristettua laippaa. Erotuksena palkki-palkki liitoksissa verrattuna pilari-palkki liitoksiin on vain, että pilaria koskevat liitoksen tiedot jätetään huomioimatta ja jatkosliitoksen kapasiteetti määrittyy liitoksen heikomman puolen mukaan. Jatkosliitoksen ollessa identtinen molemmin puolin liitosta, voidaan liitoksen kapasiteetti määrittää toisen puolen mukaan, mutta kiertymäjäykkyydessä tulee ottaa huomioon liitoksen molempien puolien vaikutus.

Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] kohdan 6.2.3 (6) mukaan konservatiivisella puolella olevalla yksinkertaistuksena ruuveilla kiinnitetyissä liitoksissa mikä tahansa ruuvirivi voidaan jättää huomioimatta liitoksen momenttikapasiteetin laskennassa, kunhan myös jokainen lähempänä puristuskeskiötä oleva ruuvirivi jätetään huomioimatta. Näin ollen osa ruuviriveistä voidaan mitoitaa vain leikkaukselle ja muodostaa liitoksen momenttikapasiteetti valittujen vedettyjen ruuvirivien avulla. Alla, Kuva 25, on esitettyä esimerkki liitoksen alimman ruuvirivin käyttämisestä vain liitoksen leikkauksen vastaan ottamiseen. Kyseissä tapauksessa alinta riviä ei huomioida liitoksen momenttikapasiteetin tai kiertymäjäykkyyden määrittämisessä, mutta rivi otetaan huomioon liitoksen leikkauskapasiteetissa.

Periaatteessa standardi SFS EN 1993-1-8 [1] antaa vapaat kädet suunnittelijalle valita leikkausriveiksi mitkä tahansa rivit, mutta suunnittelijan tulee olla tarkkana vain leikkausta vastaan ottavien rivien valinnassa. Liitoksen kapasiteetin puolesta ollaan varmallalla puolella edellä esitetyllä menettelyllä millä ruuvirivien valinnalla tahansa, kunhan liitoksen momenttikapasiteetti sekä leikkauskapasiteetti ovat riittävät. Liitoksen kiertymisjäykkyyden puolesta ruuvirivien vaikutus ei ole kuitenkaan niin selvä ja vain lähellä puristuskeskiötä olevia ruuvirivejä sopisi käyttää leikkausriveinä. Tarvittaessa voidaan käyttää leikkauspalaa liitoksessa vaikuttavan leikkauksen kantamiseen.



Kuva 25. Alimman ruuvirivin käyttäminen vain leikkausta kantavana ([9], s.5)

Tapauksessa, jossa ruuviriviin tulee sekä vetoa, että leikkausta, tulee ruuvirivi mitoittaa vedon ja leikkauksen yhteisvaikutukselle. Ruuviriveille tulevan vetovoiman määrittäminen liitokseen vaikuttavasta taivutusmomentista ei ole kuitenkaan yksiselitteinen ja yhteisvaikutusta ei saada määritettyä suoraan jokaiselle riville. Standardissa on kuitenkin annettu liitoksen leikkauskapasiteetin laskemiseksi yksinkertaistukset kappaleessa 6.2.2 kohdassa (2), jonka mukaan liitokselle saadaan määritettyä leikkausvoimakapasiteetti. Kyseinen yksinkertaistus perustuu ruuvien yhteisvaikutuskaavaan, jonka mukaan ruuvilla on vielä leikkauskapasiteettia, vaikka ruuvi itsessään on jo vetokapasiteetin rajalla. Kyseinen tulos pohjautuu ruuveille tehtyihin kokeisiin [18]. Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] kohdan 6.2.2 (2) mukaan vedetyillä ruuviriveillä voidaan olettaa olevan täysi vetokesävyden mitoitusarvo, jos alla oleva ehto toteutuu

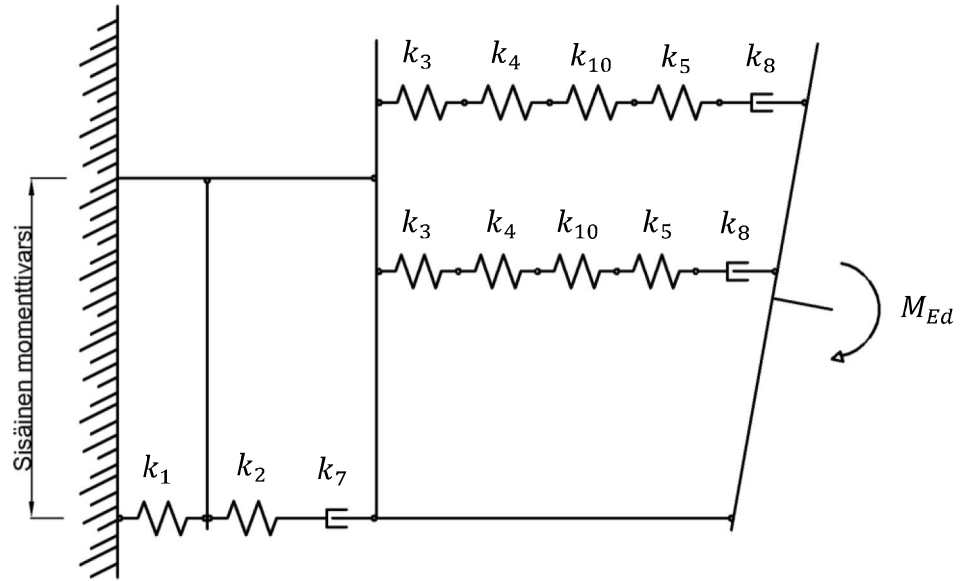
$$\frac{V_{Ed}}{\sum_v V_{v,Rd} + \frac{0.4}{1.4} \sum_t V_{t,Rd}} \leq 1.0 \quad (13)$$

jossa V_{Ed} on ruuvien leikkauksen aiheuttava leikkausvoima, $\sum_v V_{v,Rd}$ on vain leikkausta siirtävien ruuvirivien yhteenlaskettu leikkauskestävyys ja $\sum_t V_{t,Rd}$ on vetoa sekä leikkausta siirtävien ruuvirivien yhteenlaskettu leikkauskestävyys.

Ruuvien leikkauskapasiteetin laskenta on esitetty kappaleessa 3.6.8. Liitoksen momenttikapasiteetti (11) (tai (12) kun palkilla on normaalivoimaa) varmistaa, että yhdessä liitoksen peruskomponentissa ei ylitetä heikoimman komponentin veto/puristuskapasiteettia. Kaava (13) varmistaa, että liitoksella on riittävästi leikkauskapasiteettia yhteisvaikutus huomioon otettuna, vaikka kaikki vedossa olevat ruuvirivit olisivat vetokapasiteetin rajalla. Jos kaava (13) ei päde, voi ruuvien leikkaus määrätä liitoksen momenttikapasiteetin. Tällöin liitos tulee suunnitella uudelleen tai ruuvirivien mitoitusvetovoimat tulee määrittää jokaiselle ruuviriville erikseen, jolloin ruuvirivien leikkauskapasiteetti saadaan ruuviriviin vaikuttavan vetovoima perustella kaavasta (50).

3.5 Kiertymisjäykkyys ja kiertymiskyky

Liitosjäykkyys muodostetaan peruskomponenttien jäykkyyksistä olettaen jokainen komponentti erilliseksi jousekseen. Jousien yhteisvaikutus kootaan peruskomponenttien muodostamien rinnan ja sarjassa olevista jousista, josta on esitettyä periaatekuva alla.



Kuva 26. Päätylevyliitoksen jousimalli. k_1 on pilarin uuman leikkaus, k_2 on pilarin uuman poikittainen puristus, k_7 on palkin uuman ja laipan puristus, k_3 on pilarin uuman veto, k_4 on pilarin laipan taivutus, k_{10} on ruuvien veto, k_5 on päätylevyn taivutus ja k_8 on palkin uuman veto. Peruskomponenteista komponentit k_7 ja k_8 oletetaan olevan muita komponentteja huomattavasti jäykemmät ja niitä ei tarvitse huomioida liitoksen kiertymäjäykkyyden määrittämisessä.

Liitosjäykkyyden johto yllä olevassa kuvassa (Kuva 26) esitetystä jousimallista on esitettyä liitteessä A. Standardissa [1998-1-8] kiertymäjäykkyyden laskentakaava on esitettyä muodossa

$$S_j = \frac{Ez^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (14)$$

jossa k_i on komponenttiryhmän i jäykkyys ja μ on liitoksen jäykkyyssuhde $S_{j.ini}/S_j$. Liitoksen peruskomponenteista puristuspuolen ja vetopuolen ekvivalentti komponentti oletetaan olevan toisiinsa nähden sarjassa, sillä liitoksen kiertyminen vaikuttaa molemmilla puolilla samassa suhteessa. Puristuspuolella kaikki peruskomponentit oletetaan olevan sarjassa toisiinsa nähden, mutta vetopuolella jokainen erillinen ruuvirivi tarkastellaan erikseen ja ruuvirivit oletetaan olevan rinnan toisiinsa nähden. Yksittäisiin ruuviriveihin sisältyvät peruskomponentit (pilarin uuman veto, pilarin laipan taivutus, rivin vedetyt ruuvit, päätylevyn taivutus sekä palkin uuman veto) oletetaan olevan keskenään sarjassa. Kyseiset peruskomponenttien väliset yhteydet ovat selvästi esitettyä jousimallissa yllä (Kuva 26). Edellä esitetty kiertymäjäykkyyden laskentakaava ei kuitenkaan ota huomioon liitokseen mahdollisesti vaikuttavaa normaalivoimaa, joka muuttaa puristuskeskiön paikkaa. Laskentakaavat normaalivoiman huomioon ottamiseksi liitoksen kiertymäjäykkyyteen on esitetty lähteessä [18].

Kaavassa (14) esitetty jousijäykkyys $\sum_i \frac{1}{k_i}$ voidaan ajatella koostuvan puristuspuolen ja vetopuolen jousijäykkyyksistä, jolloin kyseinen termi saadaan kaavalla

$$\sum_i \frac{1}{k_i} = \frac{1}{k_{comp}} + \frac{1}{k_{eq}} \quad (15)$$

jossa k_{comp} on puristuspuolen jousijäykkyys ja k_{eq} on vetopuolen yhteen laskettu ekvivalentti jäykkyys.

Kyseisten jäykkyyksien laskennassa standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan peruskomponentit pilarin uuman sekä palkin uuman veto ja hitsit ovat niin jäykkiä, että niiden jäykkyystekijöiksi voidaan valita ääretön. Näin ollen näitä peruskomponentteja ei tarvitse huomioida liitoksen kiertymäjäykkyyden laskennassa. Myös liitoksen jäykistys vaikuttaa peruskomponenttien jäykkyyteen, mutta jäykistysten vaikutukset on jätetty tässä työssä tarkastelematta.

Puristuspuolen jäykkyyteen vaikuttaa peruskomponenttien jäykkyyksien lisäksi myös liitoksen konfiguraatio, sillä uumaan resultoiva leikkaus ja uuman jäykkyys riippuu liitoksen puolien tiedoista. Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan puristuspuolen jäykkyys voidaan laskea alla olevan taulukon mukaan. Taulukossa k_1 on pilarin uuman leikkausjäykkyys ja k_2 on pilarin uuman puristusjäykkyys. Puristuspuolen peruskomponentit palkin uuman puristus ja hitsit voidaan olettaa olevan huomattavasti muita komponentteja jäykempiä ja niitä ei tarvitse huomioida kiertymäjäykkyyden määrittämisessä.

Taulukko 3. Puristuspuolen ekvivalentti jäykkyys eri liitoskonfiguraatioilla. k_1 on pilarin uuman jäykkyys leikkauksessa ja k_2 on pilarin uuman jäykkyys poikittaisessa puristuksessa.

Liitostyyppi	Puristuspuolen ekvivalentti jäykkyys
Yksipuolinen liitos	$\frac{1}{k_{comp}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$
Kaksipuolinen liitos – Momentit yhtä suuret ja vastakkaismerkkiset liitokseen vaikuttavilla palkeilla	$\frac{1}{k_{comp}} = \frac{1}{k_2}$
Kaksipuolinen liitos – Momentit eri suuret liitokseen vaikuttavilla palkeilla	$\frac{1}{k_{comp}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$

Vetopuolen ekvivalentti jäykkyys lasketaan vedettyjen ruuvirivien jäykkyyksistä käyttäen jäykkyyksien jakautumiseen lineaarista jakaumaa puristuskeskiöön ja vedettyjen ruuvirivien painopisteeseen nähden. Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan ekvivalentti puristuspuolen jäykkyys saadaan laskettua kaavalla

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{z_{eq}} \quad (16)$$

jossa $k_{eff,r}$ on ruuvirivin r vetojäykkyys, h_r on ruuvirivin r etäisyys puristuskeskiöstä ja z_{eq} on vetopuolen ruuvirivien ekvivalentti momenttivarsi. Ekvivalentti momenttivarsi vastaa kaikkien vedettyjen ruuvirivien jäykkyyksien painopisteen painotettua etäisyyttä puristuskeskiöstä ja se lasketaan kaavalla

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r} \quad (17)$$

jossa yksittäisten ruuvirivien vetojäykkyys $k_{eff,r}$ saadaan määritettyä alla olevan taulukon mukaan. Taulukossa peruskomponentti k_3 on pilarin uuman veto, k_4 on pilarin laipan taivutus, k_5 on päätylevyn taivutus ja k_{10} ruuvien veto. Hitsit ja palkin uuma vedossa voidaan olettaa olevan huomattavasti muita komponentteja jäykemmät ja ne voidaan jättää kiertymäjäykkyyden tarkastelussa huomioimatta.

Taulukko 4. Ruuvirivien jäykkyyksien määrittämisessä huomioon otettavat peruskomponentit. k_3 on pilarin uuman jäykkyys poikittaisessa vedossa, k_4 on pilarin laipan jäykkyys taivutuksessa, k_5 on päätylevyn jäykkyys taivutuksessa ja k_{10} on ruuvien vetojäykkyys.

Liitostyyppi	Ruuvirivin jäykkyys
Palkki-pilari liitos	$\frac{1}{k_{eff,r}} = \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}$
Palkki-palkki jatkosliitos	$\frac{1}{k_{eff,r}} = \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}$

Jäykkyysuhteella μ standardin mukaiseen kiertymäjäykkyyden laskentaan on otettuna huomioon myös liitoksen peruskomponenttien epälineaarinen käyttäytyminen. Jäykkyysuhteella liitoskäyttäytyminen saadaan mallinnettua liitoksen momenttikapasiteettiin asti kokeita vastaavaksi käyttäen jäykkyysuhteelle kaavaa

$$\begin{cases} \mu = 1 & , jos M_{j.Ed} \leq \frac{2}{3} M_{j.Rd} \\ \mu = \left(\frac{1.5 M_{j.Ed}}{M_{j.Rd}} \right)^\psi & , jos M_{j.Ed} > \frac{2}{3} M_{j.Rd} \end{cases} \quad (18)$$

jossa $M_{j.Ed}$ ja $M_{j.Rd}$ ovat liitokseen vaikuttava suunnittelumomentti ja liitoksen momenttikapasiteetti. Muuttujalle ψ annetaan standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] arvot riippuen liitoksen kiinnitystavasta. Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] taulukon 6.8 mukaan ruuveilla kiinnitetyissä päätylevyliitoksissa ja pilarin pohjalevyliitoksissa muuttujan arvona käytetään $\psi = 2.7$. Edellä (Kuva 24) on esitettyä esimerkki momentti-kiertymäyhteyden mallintamisesta käyttämällä jäykkyysuuhdetta μ .

Liitoksen momentti-kiertymäyhteyden mallintaminen tulee määrittää aina rakenteen globaalin analyysimenetelmän mukaan, kuten kappaleessa 3.3 on esitetty. Liitosten kiertymäjäykkyuden lineaarinen osuus voidaan kuitenkin aina mallintaa sekanttijäykkyyttä käyttäen, jolloin liitoksen epälineaarinen käyttäytyminen yksinkertaistetaan konservatiivisella oletuksella. Sekanttijäykkyys saadaan laskettua kaavalla

$$S_j = \frac{S_{j.ini}}{\eta} \quad (19)$$

jossa $S_{j.ini}$ on liitoksen alkujäykkyys lineaarisella alueella ja η on jäykkyyden muunnoskerroin. Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan ruuveilla kiinnitetyissä pilari-palkki päätylevyliitoksissa muunnoskertoimenä voidaan käyttää $\eta = 2$.

Kiertymiskyvyn osalta standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] esitetään vain kiertymiskyvyn takaavat ehdot. Kiertymiskyvyn varmistamiseksi liitoksen murtotapa tulee olla sitkeä. Näin ollen liitoksissa, joissa esim. ruuvien leikkaus määrää taivutusmomentin arvon, ei liitoksen kiertymiskyvyn voida olettaa olevan riittävä. Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan ruuveilla kiinnitetyllä päätylevyliitoksella voidaan olettaa omaavan riittävän kiertymiskyvyn, jos

- liitoksen momenttikapasiteetti on vähintään 1.2 kertaa liittyvän palkin plastinen momenttikapasiteetti $M_{b,pl,Rd}$,
- tai
- pilarin uuman kapasiteetti määrää liitoksen momenttikapasiteetin ja uuma hoikkuus $d_{wc}/t_{wc} \leq 69\varepsilon$,
- tai
- liitoksen momenttikapasiteetin määrää pilarin laipan tai päätylevyn taivutus ja joko pilarin laipan tai päätylevyn paksuus toteuttaa ehdon $t \leq 0.36d\sqrt{f_{ub}/f_y}$.

Kaavoissa d_{wc} on pilarin uuman suoran osan pituus, t_{wc} on pilarin uuman paksuus, d on ruuvien varren halkaisija, f_{ub} on ruuvien vetomurtolujuus ja f_y pilarin laipan tai päätylevyn myötöraja.

3.6 Peruskomponenttien laskenta

Ruuveilla kiinnitettyihin palkki-pilari päätylevyliitoksiin huomioon otettavat peruskomponentit ovat; pilarin uuman veto- ja puristus, palkin uuman ja laippojen veto ja puristus, pilarin laipan ja päätylevyn taivutus, ruuvit sekä päätylevyn hitsaukset.

Peruskomponentit ja viittaukset peruskomponenttien kapasiteettien sekä jäykkyyksien laskentaan on esitetty standardin SFS EN 1993-1-8 [1] taulukossa 6.1. Tässä kappaleessa

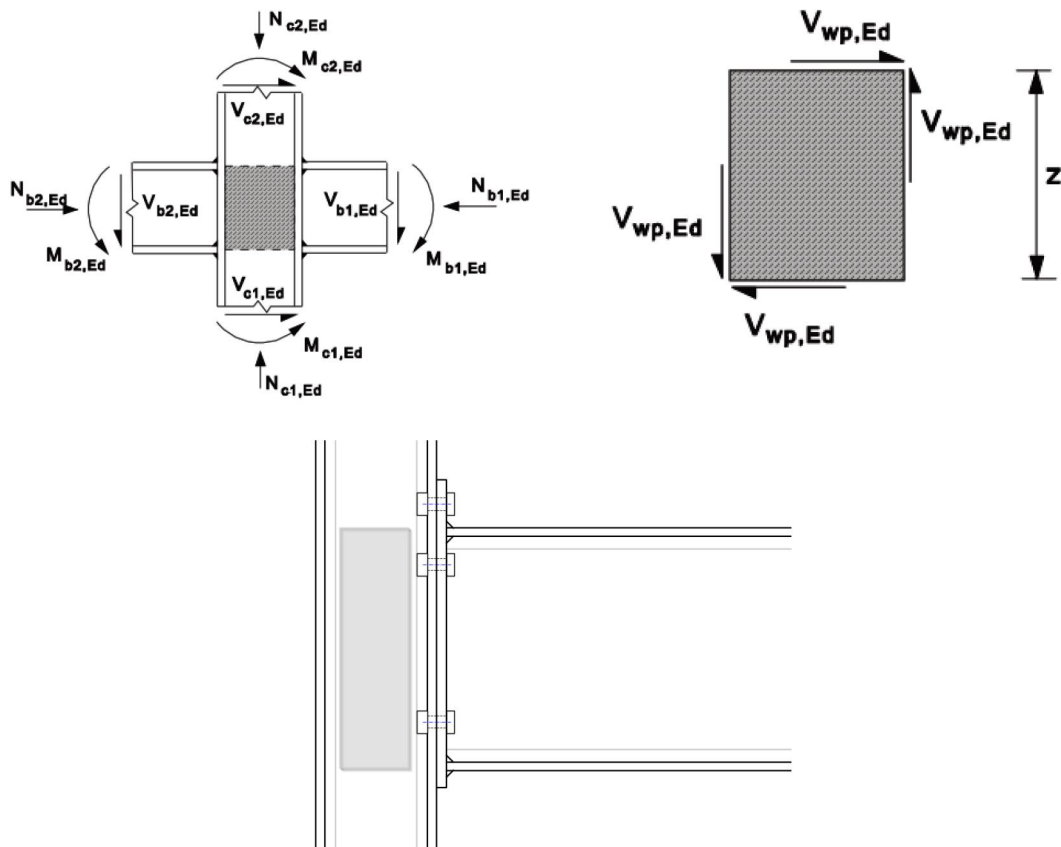
esitetään ruuveilla kiinnitettyjen pilari-palkki liitokseen huomioon otettavien peruskomponenttien ominaisuuksien standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaiset laskentakaavat. Kaikki esitetyt laskentakaavat ovat jäykistämättömille päätylevyliitoksille.

3.6.1 Pilarin uuman leikkaus

Liitokseen vaikuttavien kuormien aiheuttama uumaan kohdistuva leikkausvoima saadaan laskettua standardin mukaan kaavalla

$$V_{wp,Ed} = \frac{M_{b1,Ed} - M_{b2,Ed}}{z} - \frac{V_{c1,Ed} - V_{c2,Ed}}{2} \quad (20)$$

jossa kuormien selitteet ovat esitettynä alla (Kuva 27) ja z on liitoksen momenttivarsi. Momenttivartena voidaan käyttää liitoksen laskettua ekvivalenttia momenttivartta tai standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] esitettyjä yksinkertaistuksia. Tässä työssä momenttivartena käytettiin laskettua ekvivalenttista momenttivartta sen toimiessa kaikilla ruuvivimäärillä.



Kuva 27. Pilarin uuman leikkaus. Palkkien ja pilarin kuormien vaikutus pilarin uumaan resuloivaan kuormaan huomioidaan kaavan (20) mukaisesti. [1]

Pilarin uuman leikkauskapasiteetti saadaan määritettyä kaavalla

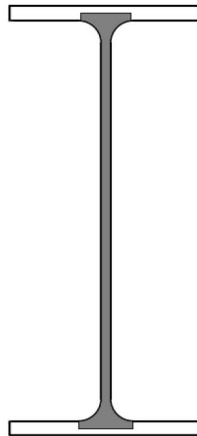
$$V_{wp.Rd} = \frac{0.9f_{y,wc}A_{vc}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \quad (21)$$

jossa $f_{y,wc}$ on palkin materiaalin myötölujuus, A_{vc} on palkin uuman leikkauspinta-ala ja γ_{M0} on rakenneosan tai poikkileikkauksen osavarmuus.

A_{vc} on pilarin uuman leikkauspinta-ala. Pilarin leikkauspinta-ala saadaan määritettyä standardin [1993-1-1] mukaan valssaamalla valmistetuille I- ja H-profiileille kaavalla

$$A_{vc} = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f \quad (22)$$

jossa A on poikkileikkauksen pinta-ala, b on poikkileikkauksen leveys, t_f on laipan paksuus, t_w on uuman paksuus ja r on valssatun poikkileikkauksen sisäpyöristyksen säde. Kyseinen leikkauspinta-ala vastaa kuvan (Kuva 28) mukaista pinta-alaa.



Kuva 28. I- ja H-profiilisten palkkien leikkauspinta-ala. Leikkauspinta-alaan huomioidaan uumaa koko korkeudelta, sisäpyöristykset ja puolet laippojen paksuudesta pyöristysten leveydeltä.

Pilarin uuman leikkauksen jäykkyys saadaan määritettyä kaavalla

$$k_1 = \frac{0.38A_{vc}}{\beta z} \quad (23)$$

jossa A_{vc} on pilarin uuman leikkauspinta-ala, β on liitokseen vaikuttavat kuormitukset huomioon ottava muunnosparametri ja z on liitoksen sisäinen momenttivarssi (Kuva 26). Leikkauspinta-ala saadaan kaavan (22) mukaan, momenttivarren määrittäminen on esitettyä kaavassa (17) ja muunnosparametri β määrittäminen on esitettyä kappaleessa 3.2.

3.6.2 Pilarin uuman poikittainen puristus

Pilarin uuman poikittainen puristus saadaan laskettua kaavalla

$$F_{c,wc,Rd} = \min \left(\frac{\omega k_{\omega c} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}, \frac{\omega k_{\omega c} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \right) \quad (24)$$

jossa ω on pilarin uumaan vaikuttavan leikkauksen mahdolliset yhteisvaikutukset huomioon ottava pienennystekijä, $k_{\omega c}$ on pilarin akselin suuntaisen jännityksen vaikutuksen vaakasuuntaiseen puristukseen huomioon ottava pienennystekijä, ρ on levylommahduksen pienennystekijä, $b_{eff,c,wc}$ on puristustetun alueen efektiivinen leveys, t_{wc} on pilarin uuman paksuus, $f_{y,wc}$ on pilarin uuman materiaalin myötölujuus ja γ_{M0} on rakenneosan/poikkileikkauksen osavarmuus.

Pilarin uuman leikkauksen vaikutuksen huomioon ottavalle pienennysparametrille on esitetty standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] laskenta kaavat taulukoituna, joissa huomioidaan myös liitokseen vaikuttavat kuormat kappaleessa 3.2 esitetyn muunnosparametrin β avulla. Kyseinen taulukko on esitettynä alla (Kuva 29).

Muunnosparametri β	Pienennystekijä ω
$0 \leq \beta \leq 0,5$	$\omega = 1$
$0,5 < \beta < 1$	$\omega = \omega_1 + 2(1 - \beta)(1 - \omega_1)$
$\beta = 1$	$\omega = \omega_1$
$1 < \beta < 2$	$\omega = \omega_1 + (\beta - 1)(\omega_2 - \omega_1)$
$\beta = 2$	$\omega = \omega_2$
$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}}$	$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + 5,2(b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}}$
A_{vc} on pilarin leikkauspinta-ala, ks. 6.2.61; β on muunnosparametri, ks. 5.3(7).	

Kuva 29. Pilarin uuman leikkauksen huomioon ottava pienennystekijä. (SFS EN 1993-1-8 [1], taulukko 6.3)

Pilarin akselin suuntaisen jännityksen huomioiva pienennystekijä $k_{\omega c}$ saadaan laskettua kaavalla

$$\begin{cases} k_{\omega c} = 1.0 & ,jos \quad \sigma_{com.Ed} \leq 0.7 f_{y,wc} \\ k_{\omega c} = 1.7 - \frac{\sigma_{com.Ed}}{f_{y,wc}} & ,jos \quad \sigma_{com.Ed} > 0.7 f_{y,wc} \end{cases} \quad (25)$$

jossa $\sigma_{com.Ed}$ on pilarin uuman suoran osuuden suurin aksiaalinen jännitys ja $f_{y,wc}$ on pilarin uuman materiaalin myötölujuus. Jännitys $\sigma_{com.Ed}$ lasketaan pilariin vaikuttavien kuormien ja pilarin poikkileikkaussuureiden avulla kimmoteorian mukaisesti.

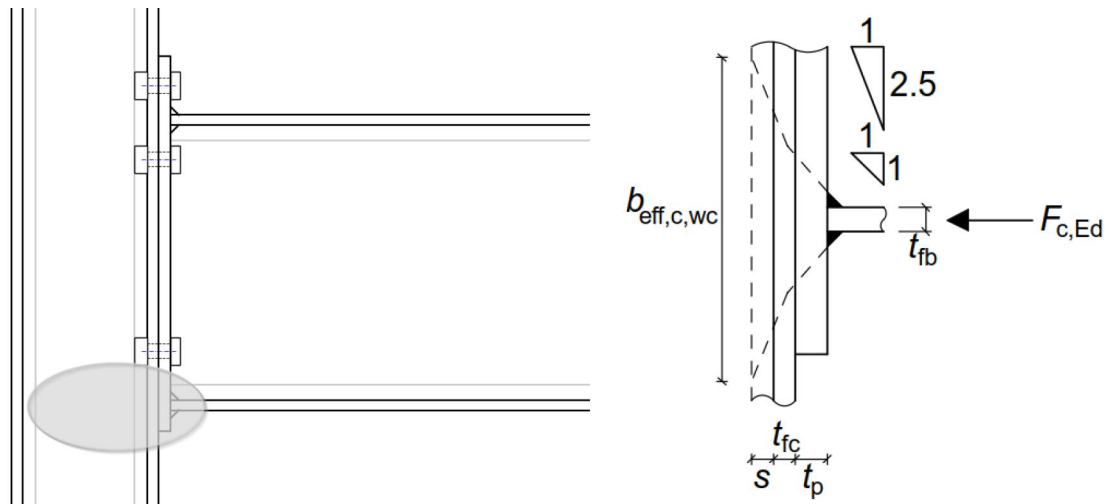
Puristusalueen efektiivinen leveys $b_{eff.c.wc}$ määritetään alla olevan kuvan (Kuva 30) mukaisesti olettaen jännitys jakauma suhteella 1/1 päätylevyn paksuuden yli ja suhteella 1/2.5 pilarin laipan paksuuden ja pilarin sisäpyörityksen yli. Efektiivinen leveys lasketaan kaavalla

$$b_{eff.c.wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p \quad (26)$$

jossa t_{fb} on pilarin laipan paksuus, a_p on päätylevyn hitsin a-mitta ja t_{fc} on pilarin laipan paksuus. $s = r_c$ (pilarin sisäpyörityksen säde) käytettäessä valssattua pilaria ja $s = \sqrt{2}a_c$ (pilarin uuman hitsin suurin leveys) käytettäessä hitsattua pilaria. s_p on leveys, mikä saadaan olettamalla jännitysten jakautuminen 45 asteen kulmassa päätylevyn yli ja jossa on huomioitu päätylevyn alaosan ylimenevän osan pituus

$$s_p = \min(2t_p, t_p + l_{lo}) \quad (27)$$

jossa t_p on päätylevyn paksuus ja l_{lo} on päätylevyn ylimenevän osan pituus palkin alapuolella. Kaavoissa (26) ja (27) käytetyt mitat ovat esitettyinä kuvassa alla (Kuva 30).



Kuva 30. Puristusalueen efektiivinen leveys pilarin uuman poikittaisessa puristuksessa. Efektiivinen leveys määritetään olettamalla jännitysten jakautuvan päätylevyn yli suhteella 1/1 ja pilarin laipan sekä pilarin sisäpyörityksen yli suhteella 1/2.5. l_{lo} on päätylevyn ylimenevän osan pituus palkin alapuolella. [1]

Pienennyskertoimella ρ otetaan huomioon pilarin uuman lommahdus, joka määräytyy uuman hoikkeuden mukaan. Pienennyskertoimen ρ arvo saadaan laskettua kaavalla

$$\begin{cases} \rho = 1.0 & ,jos \quad \lambda_p \leq 0.72 \\ \rho = \frac{\lambda_p - 0.2}{\lambda_p^2} & ,jos \quad \lambda_p > 0.72 \end{cases} \quad (28)$$

jossa λ_p on edellä esitetty uuman hoikkuus.

Pilarin uumaa tarkastellaan $b_{eff.c.wc}$ levyisenä ja pilarin uuman suoran osan pituisena levynä, jota puristetaan. Näin ollen levyn hoikkuudeksi saadaan

$$\lambda_p = 0.932 \sqrt{\frac{b_{eff.c.wc} d_{wc} f_{y.wc}}{E t_{wc}^2}} \quad (29)$$

jossa $b_{eff.c.wc}$ on edellä esitetty puristetun alueen efektiivinen leveys, $f_{y.wc}$ ja E ovat uuman materiaalin myötölujuus ja kimmokerroin ja t_{wc} on uuman paksuus. Pilarin uuman suoran osan pituus saadaan laskettua kaavalla

$$\begin{cases} d_w = h - 2(t_f + r) & \text{valssattu} \\ d_w = h - 2(t_f + \sqrt{2}a) & \text{hitsattu} \end{cases} \quad (30)$$

jossa h on pilarin kokonaiskorkeus, t_f on pilarin laipan paksuus, r on valssatun pilarin uuman ja laipan välinen pyöristys ja a on hitsautun pilarin uuman ja laipan välisen hitsin a-mitta.

Pilarin puristetun uuman jäykkyys saadaan laskettua kaavalla

$$k_2 = \frac{0.7 b_{eff.c.wc} t_{wc}}{d_{wc}} \quad (31)$$

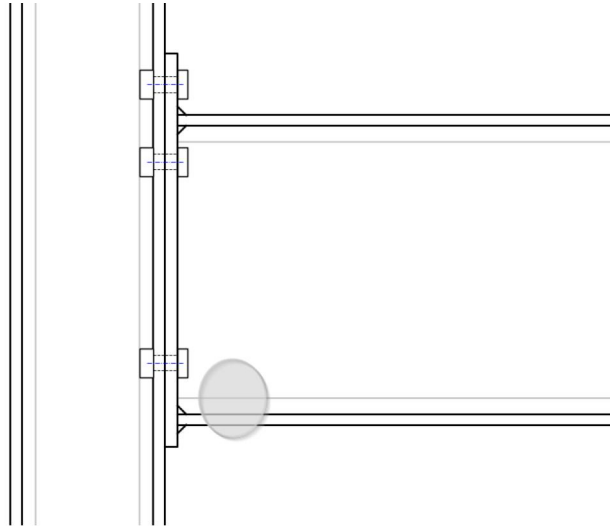
jossa olevat muuttujat ovat esitettyinä edellä.

3.6.3 Palkin laipan ja uuman puristus

Palkin laipan ja uuman puristus (Kuva 31) määritetään liittyvän palkin kestävyysavulla. Kapasiteetti saadaan laskettua kaavalla

$$F_{c.fb.Rd} = \frac{M_{c.Rd}}{h_b - t_{fb}} \quad (32)$$

jossa t_{fb} on palkin laipan paksuus, h_b on palkin korkeus ja $M_{c.Rd}$ on palkin taivutuskestävyyden mitoitusarvo, jossa on huomioituna leikkauksen vaikutus.



Kuva 31. Palkin laipan ja uuman puristus

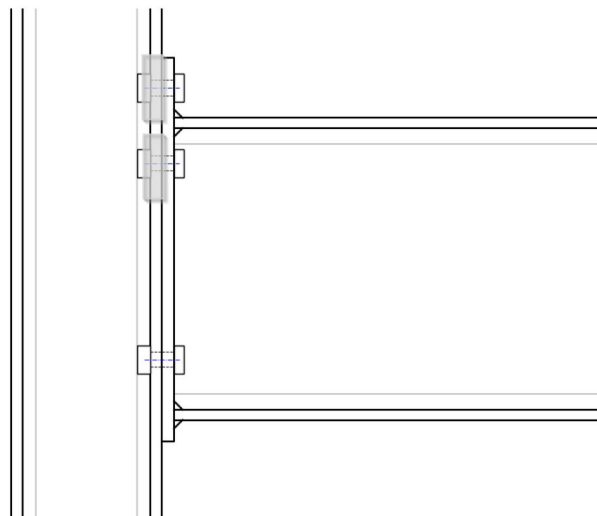
Palkin puristetun laipan ja uuman jäykkyydeksi voidaan valita

$$k_7 = \infty \quad (33)$$

Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan palkin laippa ja uuma ovat muihin peruskomponentteihin nähden huomattavasti jäykempi puristuksessa ja se voidaan siten jättää huomioimatta kiertymäjäykkyyden määrittämisessä.

3.6.4 Pilarin laipan taivutus

Kuvassa alla (Kuva 32) on esitetty periaatekuva pilarin laipan taivutuksesta. Pilarin laipan taivutus tulee tarkistaa sekä yksittäisille ruuviriveille ja ruuvirivien ryhmille, jotta kaikki liitoksen mahdolliset murtomuodot tulevat huomioituiksi.



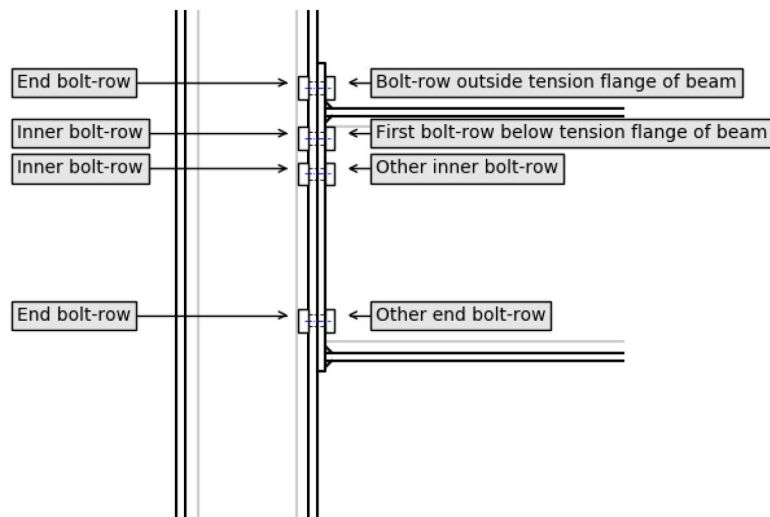
Kuva 32. Pilarin laipan taivutus

Pilarin laipan taivutuksen kapasiteetin sekä jäykkyyden määrittämisessä käytetään hyväksi T-osaa, jonka perusidea ja kapasiteetin määrittäminen ovat esitettyinä kappaleessa 3.2.2. Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaiset pilarin laipan taivutusta vastaavat T-osan efektiiviset leveydet ovat esitettyinä alla (Kuva 33). Efektiivisten leveyksien määrittämiseen tarvittavat ruuvirivein reunaetäisyydet ovat esitettyinä kappaleessa 3.2.3.

Ruuvirivin sijainti	Ruuviriviä tarkastellaan yksittäisenä ruuvirivinä		Ruuviriviä tarkastellaan ruuvirivien ryhmän osana	
	Pyöreä myötökuvio $\ell_{eff,cp}$	Ei-pyöreä myötökuvio $\ell_{eff,nc}$	Pyöreä myötökuvio $\ell_{eff,cp}$	Ei-pyöreä myötökuvio $\ell_{eff,nc}$
Sisempi ruuvirivi	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Reunimmainen ruuvirivi	Pienempi arvoista: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	Pienempi arvoista: $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	Pienempi arvoista: $\pi m + p$ $2e_1 + p$	Pienempi arvoista: $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Murtumismalli 1:	$\ell_{eff,1} = \ell_{eff,nc}$ mutta $\ell_{eff,1} \leq \ell_{eff,cp}$		$\sum \ell_{eff,1} = \sum \ell_{eff,nc}$ mutta $\sum \ell_{eff,1} \leq \sum \ell_{eff,cp}$	
Murtumismalli 2:	$\ell_{eff,2} = \ell_{eff,nc}$		$\sum \ell_{eff,2} = \sum \ell_{eff,nc}$	

Kuva 33. Jäykistämättömien pilarin laippojen teholliset leveydet (SFS EN 1993-1-8 [1], taulukko 6.4)

Kyseisessä kuvassa on esitettyä myös jäykisteiden vaikutus efektiivisiin leveyksiin, mutta tässä työssä tarkasteltavissa jäykistämättömien pilarin laippojen tarkastelussa tarvitaan vain ruuvirivien sijaintitietoja 'Muu sisempi ruuvirivi' ja 'Muu reunan ruuvirivi' alla olevan kuvan (Kuva 34) mukaisesti.



Kuva 34. Esimerkki ruuvirivien paikoista laipan ja päätylevyn puolella jäykistämättömässä päätylevyliitoksessa. Kuvassa myös alin rivi on huomioitu veto-kuormitusta kantavana

Laipan taivutuksen murtomuotojen kapasiteetit saadaan kappaleen 3.2.2 kuvassa (Kuva 15) esitettyjen kaavojen mukaan käyttämällä yllä olevasta taulukosta (Kuva 33) saatuja

efektiivisiä leveyksiä. Laipan määräävä kapasiteetti saadaan kappaleessa 3.2.3 esitetyllä kaavalla (3) tai (4).

Pilarin taivutetun laipan jäykkyys saadaan laskettua kaavalla

$$k_4 = \frac{0.9l_{eff}t_{fc}^3}{m^3} \quad (34)$$

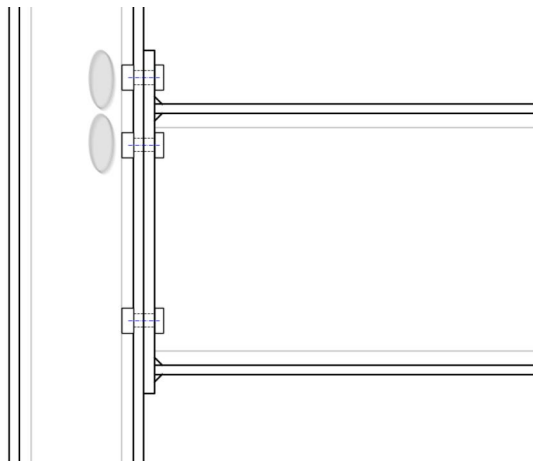
jossa l_{eff} on ruuvirivin T-osan pienin tehollinen pituus (yksittäisenä ruuvirivinä tai ruuviryhmän osana tarkasteltuna), t_{fc} on pilarin laipan paksuus ja m on reunaetäisyys pilarin uumaan kuvan (Kuva 17) mukaisesti.

3.6.5 Pilarin uuman poikittainen veto

Ruuveilla kiinnitetyissä päätylevyliitoksissa pilarin uuman poikittaisen vedon kapasiteetti saadaan laskettua kaavalla

$$F_{t.wc.Rd} = \frac{\omega b_{eff.t.wc} t_{wc} f_{y.wc}}{\gamma_{M0}} \quad (35)$$

jossa t_{wc} on pilarin uuman paksuus, $f_{y.wc}$ on uuman materiaalin myötölujuus ja γ_{M0} on rakenneosan/poikkileikkauksen osavarmuus. Pilarin uuman leikkauksen huomioon ottava pienennystekijä ω voidaan määrittää kuvan (Kuva 29) mukaan käyttämällä uuman poikittaisen vedon mukaista tehollista leveyttä $b_{eff.t.wc}$. Tehollinen leveys $b_{eff.t.wc}$ valitaan tarkasteltavan ruuvirivin/ruuviryhmän taivutettua pilarin laippaa vastaavan T-osan pienimmän tehollisen leveyden kanssa yhtä suureksi. T-osan tehollisen leveyden määrittäminen on esitetty edellisessä kappaleessa 3.6.4. Kuvassa alla (Kuva 35) on esitettynä periaatekuva pilarin uuman vedossa tarkasteltavasta kohdasta.



Kuva 35. Pilarin uuman veto

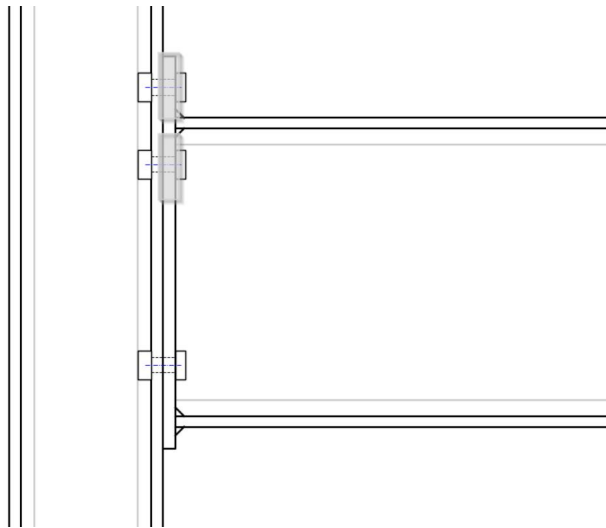
Pilarin uuman jäykkyys vedossa saadaan määritettyä kaavalla

$$k_3 = \frac{0.7 b_{eff.t.wc} t_{wc}}{d_{wc}} \quad (36)$$

jossa t_{wc} on pilarin uuman paksuus ja d_{wc} on pilarin uuman suoran osan pituus. Tehollinen leveys $b_{eff.t.wc}$ valitaan yhtä suureksi pilarin taivutetun laipan T-osan pienimmän tehollisen leveyden kanssa yksittäisenä ruuvirivinä tai ruuviryhmänä osana tarkasteltuna.

3.6.6 Päätylevyn taivutus

Päätylevyn taivutus tarkastellaan myös T-osien avulla. Kuvassa alla (Kuva 36) on esitettyä periaatekuva päätylevyn taivutuksesta.



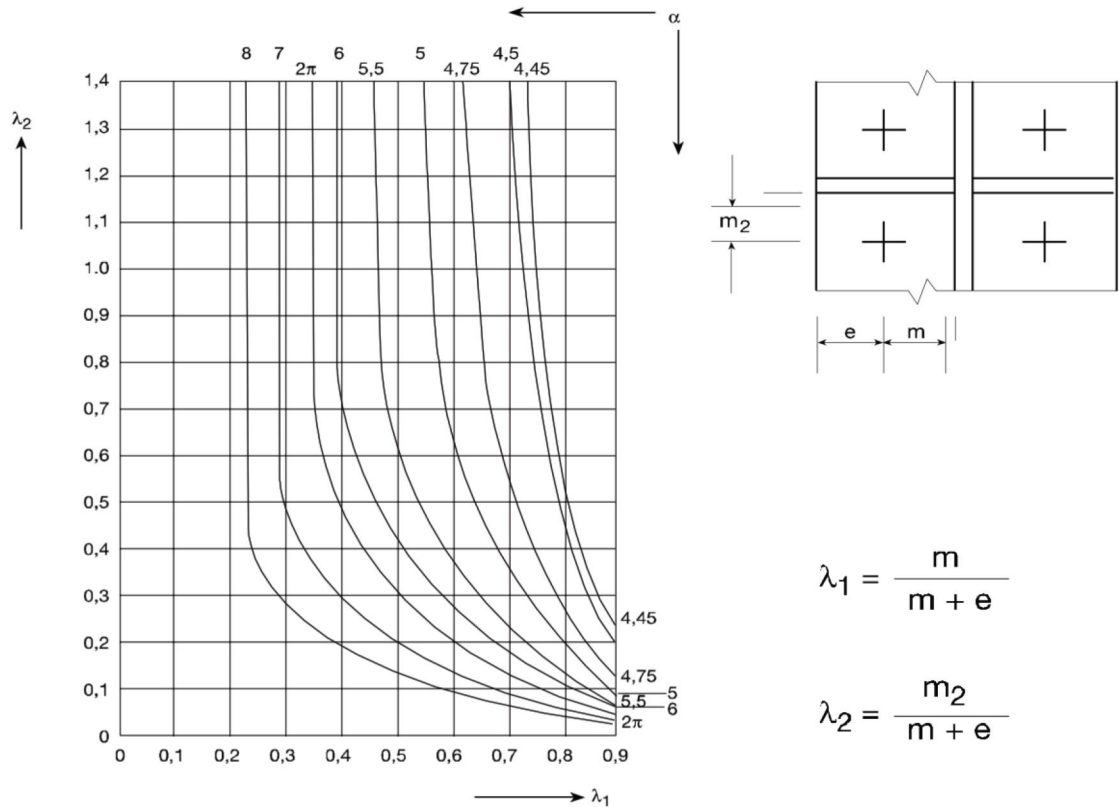
Kuva 36. Päätylevyn taivutus

Ruuvirivin sijainnista riippuen T-osan efektiivinen leveys määritetään standardin taulukoitujen arvojen mukaan, jotka ovat esitettyinä kuvassa alla (Kuva 37). Myös päätylevyn taivutuksen tarkastelussa kapasiteetti sekä jäykkyys tulee tarkistaa sekä yksittäisille ruuviriveille, että kaikille ruuviryhmäkonfiguraatioille määräävimmän tapauksen löytämiseksi. Kappaleessa 3.2.3 on esitettyä ruuviryhmien muodostaminen sekä kuvan (Kuva 37) taulukossa tarvittavat reunaetäisyydet.

Ruuvirivin sijainti	Ruuviriviä tarkastellaan yksittäisenä ruuvirivinä		Ruuviriviä tarkastellaan ruuvirivien ryhmän osana	
	Pyöreä myötökuvio $\ell_{\text{eff,cp}}$	Ei-pyöreä myötökuvio $\ell_{\text{eff,nc}}$	Pyöreä myötökuvio $\ell_{\text{eff,cp}}$	Ei-pyöreä myötökuvio $\ell_{\text{eff,nc}}$
Palkin vedetyn laipan ulkopuolella oleva ruuvirivi	Pienin arvoista: $2\pi m_x$ $\pi m_x + w$ $\pi m_x + 2e$	Pienin arvoista: $4m_x + 1,25e_x$ $e + 2m_x + 0,625e_x$ $0,5b_p$ $0,5w + 2m_x + 0,625e_x$	—	—
Palkin vedetyn laipan alapuolella oleva ensimmäinen ruuvirivi	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
Muu sisempi ruuvirivi	$2\pi m$	$4m + 1,25 e$	$2p$	p
Muu reunan ruuvirivi	$2\pi m$	$4m + 1,25 e$	$\pi m + p$	$2m + 0,625e + 0,5p$
Murtumismalli 1:	$\ell_{\text{eff,1}} = \ell_{\text{eff,nc}}$ mutta $\ell_{\text{eff,1}} \leq \ell_{\text{eff,cp}}$		$\sum \ell_{\text{eff,1}} = \sum \ell_{\text{eff,nc}}$ mutta $\sum \ell_{\text{eff,1}} \leq \sum \ell_{\text{eff,cp}}$	
Murtumismalli 2:	$\ell_{\text{eff,2}} = \ell_{\text{eff,nc}}$		$\sum \ell_{\text{eff,2}} = \sum \ell_{\text{eff,nc}}$	

Kuva 37. Päätylevyn teholliset leveydet (SFS EN 1993-1-8 [1], taulukko 6.6)

Kuvan (Kuva 37) taulukossa esitetyllä muuttujalla α otetaan huomioon ruuvirivin myötöviivan muoto riippuen rivin reunaetäisyyksistä. Kuvassa (Kuva 38) on esitettyä kuvaaja α :n määrittämiseen. Määrittämiseen tarvitaan ruuvirivin reunaetäisyydet palkin uumaan sekä laippaan. Samalla kuvaajalla saataisiin myös määritettyä taivutettujen jäykistettyjen pilarin laippojen kapasiteetti, jossa reunaetäisyydet otettaisiin pilarin uumaan ja jäykistävään levyyn nähden.



Kuva 38. α :n arvot pilarien jäykistetyille laipoille ja päätylevyille (SFS EN 1993-1-8 [1], kuva 6.11)

Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] kuva α :n määrittämiseen (Kuva 38) ei kuitenkaan ole käyttökelpoinen päätylevylitoksen laskentapohjassa, joten laskentapohjassa on käytetty alfan määrittämiseen lähteessä [18] esitettyä iteratiivista metodia. Menetelmässä λ_1 arvo on esitetty λ_2 ja α arvojen avulla

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_1^* + (1 - \lambda_1^*) \left(\frac{\lambda_2^* - \lambda_2}{\lambda_2^*} \right)^{\frac{\alpha}{\sqrt{2}}} & ,jos \quad \lambda_2 < \lambda_2^* \\ \lambda_1 = \lambda_1^* & ,jos \quad \lambda_2 \geq \lambda_2^* \end{cases} \quad (37)$$

$$\lambda_1^* = \frac{1.25}{\alpha - 2.75} \quad (38)$$

$$\lambda_2^* = \frac{\alpha \lambda_1^*}{2} \quad (39)$$

Esitettyjen kaavojen avulla α :n arvo saadaan iteroimalla alla esitetyn pseudokoodin mukaisesti

```

alpha = 6.5    # initialization
while | lambda_1 - lambda_1(lambda_2, alpha) | > 0.001
    alpha = alpha + lambda_1 - lambda_1(lambda_2, alpha)

```

jossa λ_1 ja λ_2 ovat ruuvirivin reunaetäisyyksien avulla lasketut apusuureet, $\lambda_1(\lambda_2, \alpha)$ on kaavan (37) mukaan laskettu apusuureen λ_1 arvo. Iterointikaavan lisäksi α :n arvon määrittämiseksi on kehitetty myös suora menetelmä, joka on esitetty lähteessä [22].

Päätylevyn taivutuksen murtomuotojen kapasiteetit saadaan kappaleessa 3.2.2 (Kuva 15) esitettyjen kaavojen mukaan käyttämällä yllä olevasta taulukosta (Kuva 37) saatuja efektiivisiä leveyksiä. Päätylevyn määräävä kapasiteetti saadaan kappaleessa 3.2.3 esitetyllä kaavalla (3) tai (4).

Taivutetun päätylevyn jäykkyys saadaan laskettua kaavalla

$$k_5 = \frac{0.9 l_{eff} t_p^3}{m^3} \quad (40)$$

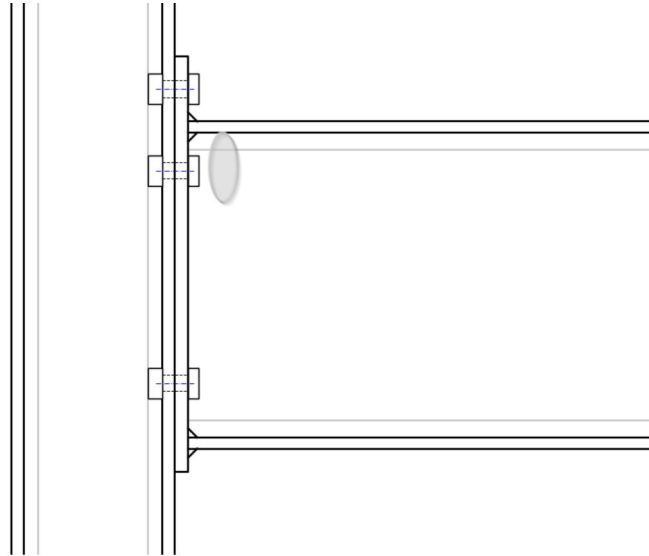
jossa l_{eff} on ruuvirivin T-osan pienin tehollinen pituus (yksittäisenä ruuvirivinä tai ruuviryhmän osana tarkasteltuna), t_p on päätylevyn paksuus ja m on reunaetäisyys palkin uumaan kuvan (Kuva 17) mukaisesti.

3.6.7 Palkin uuman veto

Palkin uuman vedon kapasiteetti saadaan laskettua kaavalla

$$F_{t.wb.Rd} = \frac{b_{eff.t.wb} t_{wb} f_{y.wb}}{\gamma_{M0}} \quad (41)$$

jossa t_{wb} on palkin uuman paksuus, $f_{y.wb}$ on uuman materiaalin myötölujuus ja γ_{M0} on rakenneosan/poikkileikkauksen osavarmuus. Tehollinen leveys $b_{eff.t.wb}$ valitaan tarkasteltavan ruuvirivin/ruuviryhmän taivutettua päätylevyä vastaavan T-osan pienimmän tehollisen leveyden kanssa yhtä suureksi. Kuvassa alla (Kuva 39) on esitettynä tarkasteltavan kohdan esimerkkikuva.



Kuva 39. Palkin uuman veto

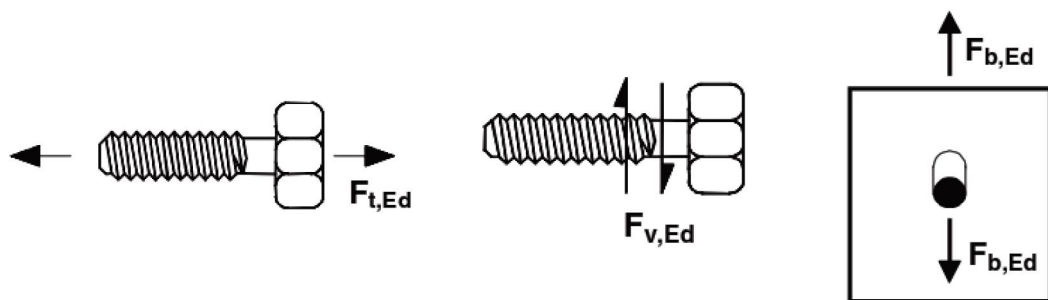
Palkin vedetyn uuman jäykkyydeksi voidaan valita

$$k_8 = \infty \quad (42)$$

Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan palkin vedetty uuma voidaan olettaa olevan huomattavasti muita peruskomponentteja jäykempi ja sen vaikutus voidaan jättää kiertymäjäykkyyden laskennassa huomioimatta.

3.6.8 Ruuvien kapasiteetti

Ruuvien kapasiteetit määritetään standardin SFS EN 1993-1-8 [1] taulukon 3.4 mukaan ruuvien vetokapasiteetille sekä leikkauskapasiteetille. Ruuvien leikkauskapasiteetti saadaan ruuvien poikkileikkauksen leikkauskapasiteetin ja reunapuristuskestävyydelle kautta. Kuvasssa alla (Kuva 40) on esitettyinä ruuvien periaatekuvat kapasiteeteista.



Kuva 40. Ruuvien kapasiteetti; vetokapasiteetti, leikkauskapasiteetti ja reunapuristus. [1993-1-8]

Yleisesti ottaen päätylevyliitoksissa ruuvit voidaan mitoittaa standardin SFS EN 1993-1-8 [1] kiinnitysluokkien A ja D mukaan leikkauskuormituksen reunapuristuksella kantaviksi ja esijännittämättömiksi. Ruuvien esijännitys saattaa tulla kuitenkin merkittäväksi päätylevyliitoksissa, joissa liitoksen liukumisen aiheuttama liitosjäykkyyden muutos vaikuttaa muiden rakenneosien kapasiteettiin, kuten hoikan pilarin tapauksessa sivusiirtyvässä kehässä. Kyseisessä tapauksessa tarvittavat liitokset tulisi mitoittaa leikkauskapasiteetin puolesta standardin SFS EN 1993-1-8 [1] kiinnitysluokalla C. Suurimman hyödyn esikiristetyillä ruuveilla kuitenkin saadaan väsymistä vastaan, liitoksissa joissa on syklinen kuormitus. Esijännityksellä ruuvien jännitystaso pystytään nostamaan kuormitusamplitudia suuremmaksi, jolloin väsyttävää kuormitusta ei pääse ruuveille tapahtumaan. [23] Päätylevyliitosten kohdalla esimerkiksi sivusiirtyvissä kehissä liitoksille saattaa päästä syntymään vaihtuvia kuormituksia. Standardi SFS EN 1993-1-8 [1] kuitenkin sallii myös esikiristämättömien ruuvien käytön väsyttävää kuormitusta omaavissa liitoksissa, jos kuormitusrytmit aiheutuvat tuulikuormista.

Ruuvien esijännittäminen on hidasta ja kallista, joten niiden käyttöä tulisi välttää. Rakennuksissa esijännitettyjen ruuvien käyttö on usein tarpeetonta ja suuressa osassa tapauksista liitoskonfiguraation muuttamisella esijännitettyjen ruuvien käyttö voidaan kiertää. [23] Päätylevyliitosten tapauksessa esimerkiksi leikkauspalan käyttö liitoksen leikkausvoimien vastaan ottamiseen on usein järkevää. Tässä työssä liitokset mitoitetaan reunapuristustyyppisinä ja esijännittämättöminä, eikä leikkauspalan mitoittamiseen näin ollen kuitenkaan oteta kantaa.

Ruuvien vetokapasiteetti saadaan laskettua kaavalla

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (43)$$

jossa $k_2 = 0.63$ uppokantaisille ruuveille ja $k_2 = 0.9$ muissa tapauksissa. f_{ub} on ruuvien murtoraja, A_s on ruuvien jännityspinta-ala (ottaa kierteet huomioon) ja γ_{M2} on kiinnitysosien osavarmuusluku.

Ruuvien poikkileikkauksen leikkauskapasiteetti saadaan laskettua kaavalla

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (44)$$

jossa f_{ub} on ruuvien murtoraja ja γ_{M2} on kiinnitysosien osavarmuusluku. Pinta-ala A riippuu ruuvien kierteiden paikasta leikkauksessa. Jos ruuvien kierteet ovat leikkaustasossa käytetään pinta-alana jännityspinta-alaa A_s ja jos ruuvien kierteetön osa on leikkaustasossa, voidaan käyttää kierteettömän osan pinta-alaa. Ruuvien leikkaus on hauras komponentti, joten varmuuden kasvattamiseksi voidaan käyttää kaikissa tapauksissa ruuvien jännityspinta-alaa A_s . Kerroin α_v ottaa huomioon ruuvien lujuusluokan

$$\begin{cases} \alpha_v = 0.6 & , \text{lujuusluokilla 4.6, 5.6 ja 8.8} \\ \alpha_v = 0.5 & , \text{lujuusluokilla 4.8, 5.8, 6.8 ja 10.9} \end{cases} \quad (45)$$

Ruuvien reunapuristuskestävyys saadaan kaavalla

$$F_{b.Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (46)$$

jossa

$$\alpha_b = \min(\alpha_d, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1.0) \quad (47)$$

Yllä olevissa kaavoissa f_u on puristetun levyn murtolujuus, f_{ub} on ruuvien murtolujuus, d on ruuvien nimellinen halkaisija t on puristetun levyn paksuus ja γ_{M2} on kiinnitysosien osavarmuusluku. Kaavojen muuttujien α_d ja k_1 määrittäminen on esitetty taulukossa alla.

Taulukko 5. Apumuuttujat reunapuristuksen laskentaan.

	Levyn pään ruuvit	Muut kuin levyn pään ruuvit
Siirrettävän voiman suunnassa	$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$	$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$
Kohtisuorassa siirrettävään voimaan nähden	$k_1 = \min(2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 2.5)$	$k_1 = \min(1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7, 2.5)$

Taulukossa e_1 on reunaetäisyys levyn vapaaseen reunaan ja p_1 ruuvien keskiöetäisyys siirrettävän voiman suunnassa. e_2 on reunaetäisyys levyn vapaaseen reunaan ja p_2 ruuvien keskiöetäisyys siirrettävään voimaan nähden kohtisuorassa suunnassa. Kyseiset ruuvien reunaetäisyydet ovat esitettyinä kappaleessa 3.2.3. Muuttuja d_0 on ruuvien reiän halkaisija ja voidaan määrittää ruuvien nimellisen halkaisijan mukaan olettaen normaalit pyöreät reiät seuraavasti

$$\begin{cases} d_0 = d + 1 & , \text{jos } d < 16 \\ d_0 = d + 2 & , \text{jos } 16 \leq d \leq 24 \\ d_0 = d + 3 & , \text{jos } d > 24 \end{cases} \quad (48)$$

jossa d on ruuvien nimellinen halkaisija.

Ruuvien määräävä leikkauskapasiteetti saadaan laskettua kaavalla

$$F_{V.Rd} = \min(F_{v.Rd}, F_{b.Rd}) \quad (49)$$

jossa $F_{v.Rd}$ on ruuvien poikkileikkauksen leikkauskapasiteetti ja $F_{b.Rd}$ on ruuvien reunapuristuskestävyys

Lisäksi vedetyillä ruuveilla tulisi tarkistaa vedon ja leikkauksen yhteisvaikutus alla olevan kaavan mukaisesti

$$\frac{F_{V.Ed}}{F_{V.Rd}} + \frac{F_{t.Ed}}{1.4F_{t.Rd}} \leq 1.0 \quad (50)$$

jossa $F_{V.Ed}$ on ruuviin vaikuttava suunnitteluleikkausvoima, $F_{V.Rd}$ on ruuvien mitoitusleikkauskapasiteetti, $F_{t.Ed}$ on ruuvien suunnitteluvetovoima ja $F_{t.Rd}$ on ruuvien mitoitusvetokapasiteetti. Yhteisvaikutus otetaan kuitenkin huomioon koko liitoksen momenttikapasiteetin ja leikkauskapasiteetin laskennassa ja siten yhteisvaikutusta ei tarvitse tarkistaa jokaiselle ruuviriville erikseen. Yhteisvaikutuksen tarkastaminen liitoksessa on esitetty kappaleessa 3.4.

Ruuvien venymäpituutta vastaava jäykkyys saadaan laskettua kaavalla

$$k_{10} = \frac{1.6A_s}{L_b} \quad (51)$$

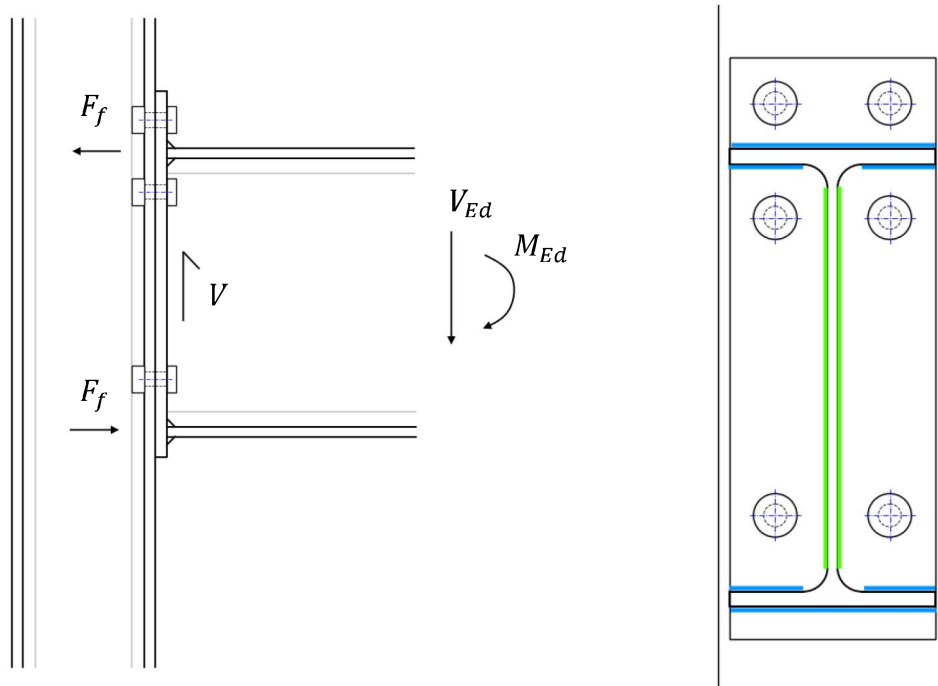
jossa A_s on ruuvien jännityspinta-ala, jossa otetaan huomioon ruuvien kierteiden vaikutus. L_b on ruuvien venymäpituus, johon otetaan huomioon päätylevyliitoksissa liittymispituus ja puolet ruuvien kannan ja mutterin korkeudesta. Ruuvien liittymispituudeksi voidaan olettaa pilarin laipan paksuus + päätylevyn paksuus + mahdollisten aluslevyjen paksuus.

3.6.9 Hitsit

Hitsit ovat liitoksessa hauraat osat ja ne tulee aina mitoittaa niin, ettei koko liitoksen kapasiteetti määräydy hitsien mukaan. Hitsien mitoittamisessa voidaan käyttää yksinkertaistettua mitoitusmenettelyä tai määrittää hitsien koot hitsien jännityskomponentteihin perustuen. Päätylevy liitoksen tapauksessa hitseille tuleva kuormitus pystytään selkeästi jakamaan hitseille, joten myös kuormituskomponentteihin perustuvaa mitoitusmenettelyä voidaan käyttää.

Hitsien mitoituksessa voidaan käyttää plastista kuormajakaumaa hitseillä, kunhan kyseinen jakauma on tasapainossa liitokseen vaikuttavien kuormien kanssa. I- ja H-poikkileikkauksilla uuman hitsien voidaan olettaa ottavan vastaan liitoksen leikkausvoimat. Momentin voidaan olettaa laippojen kannettavaksi ja myös palkin normaalivoiman vaikutus otetaan kuormituksessa myös huomioon. Heikomman suunnan momentin vaikutus jätetään tässä tarkastelussa ottamatta huomioon, sillä laskentakaavoja ruuveilla kiinnitettyjen päätylevyliitosten heikomman suunnan kapasiteetin määrittämiseen ei ole esitetty standardin SFS EN 1993-1-8 [1] komponenttimenetelmässä. Kuvassa alla (52) on esitettyä kuormien jakautumisen periaatekuva.

Kimmoteorian mukaista kokonaisanalyysiä käytettäessä päätylevyn hitsit voidaan mitoittaa joko liitokseen vaikuttavien kuormien mukaan tai tasalujiksi palkin kanssa. Kuormien mukaan mitoittaessa tulee kuitenkin varmistaa, että hitsit eivät määrää liitoksen kapasiteettia. Plastisuusteorian mukaista kokonaisanalyysiä käytettäessä päätylevyn hitsit tulee mitoittaa tasalujiksi palkin kanssa, jotta voidaan varmistaa plastisen nivelen mahdollisuus syntyä palkkiin ilman hitsien pettämistä.



Kuva 41. Liitoksen kuormien jakautuminen päätylevyn hitseille. Leikkausvoiman kantavan uuman hitsit, joiden tehollisena pituutena käytetään palkin uuman suoran osan pituutta (vihreä). Liitoksen momentti siirtyy palkin laippojen hitsien kautta, joiden tehollisessa pituudessa jätetään pyöristyksen huomioimatta (sininen). Laippojen hitsien mitoittamisessa momenttivarren voidaan olettaa olevan palkin laippojen keskiöetäisyys.

Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan pienahitsin kestävyys on riittävä, jos molemmat seuraavista ehdoista pätevät

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (52)$$

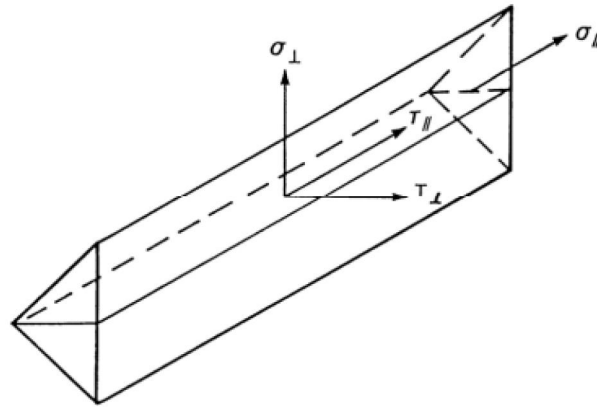
$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0.9 f_u}{\gamma_{M2}} \quad (53)$$

joissa f_u on heikomman liitettävän osan vetomurtolujuuden arvo ja γ_{M2} on kiinnitysosien osavarmuuskertoimen. Korrelaatio kerroin β_w ottaa huomioon hitsattavan teräksen lujuuden ja voidaan valita alla olevan taulukon mukaan (SFS EN 1993-1-8 [1], taulukko 4.1).

Taulukko 6. Heikomman hitsattavan kappaleen mukaan määritettävä pienahitsin korrelaatiokerroin (SFS EN 1993-1-8 [1], taulukko 4.1)

Heikomman hitsattavan kappaleen teräslaji	Korrelaatiokerroin β_w
S235	0.8
S275	0.85
S355	0.9
S420	1.0
S460	1.0

Pienahitsien jännitykset ovat esitettyinä kuvassa alla (Kuva 42). Jännityksistä hitsin pituussunnan normaali-jännitys σ_{\parallel} johtuu pääasiassa hitsin muodonmuutoksesta ja sen vaikutus hitsin kapasiteettiin on pieni verrattuna muihin hitsin jännityskomponentteihin [24]. Näin ollen jännityskomponenttia σ_{\parallel} ei oteta hitsin kapasiteetin määrittämisessä huomioon.



Kuva 42. Pienahitsin jännitykset [1]

Liitoksen momentin oletetaan kulkevan palkin laippojen kautta, jolloin hitsien mitoittamiseen sisäisenä momenttivartena voidaan pitää palkin laippojen keskiöväliä. Sisäisen momenttivarren kautta laippojen pienahitsien kuormiksi saadaan

$$F_f = \frac{|M_{j.Ed}|}{h_b - t_{fb}} + |N_{j.Ed}| \quad (54)$$

jossa $M_{j.Ed}$ on liitoksessa vaikuttava momentti, $N_{j.Ed}$ on liitokseen vaikuttava normaali-voima, h_b on palkin korkeus ja t_{fb} on palkin laipan paksuus. Itseisarvoilla on otettu huomioon momentin ja normaalivoiman suurin yhteisvaikutus hitsien mitoittamisen.

Laippojen hitsien tehollisessa leveydessä otetaan huomioon vain laippojen tasaiset osat, joka on konservatiivinen oletus. Todellisuudessa päätylevy hitsataan kiinni palkkiin koko palkin poikkileikkauksen piirin matkalta. Laippojen hitsien tehollisiksi leveyksiksi saadaan

$$\begin{cases} l_{eff,f} = 2b_b - (t_{wb} + 2r_b) & \text{valssattu palkki} \\ l_{eff,f} = 2b_b - (t_{wb} + 2\sqrt{2}a_b) & \text{hitsattu palkki} \end{cases} \quad (55)$$

jossa b_b on palkin leveys, t_{wb} on palkin uuman paksuus, r_b on valssatun palkin uuman ja laipan välinen pyöristys ja a_b on hitsatun palkin uuman ja laipan välisen hitsin a-mitta.

Momentin aiheuttaman kuormituksen voidaan olettaa vaikuttavan laipan suunnassa (Kuva 41), joten kuorma F_f aiheuttaa hitsille jännitykset

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}}F_f}{l_{eff,f}a_f} \quad (56)$$

jossa F_f ja $l_{eff,f}$ ovat esitetty edellä ja a_f on päätylevyn kiinnityksessä käytetty laipan pienahitsin a-mitta. Nyt hitsin käyttöasteiden kaavojen mukaan saadaan laipan hitsien koolle johdettua kaavat

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} &\leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \\ \Rightarrow \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{\sqrt{2}}F_f}{l_{eff,f}a_f}\right)^2 + 3\left[\left(\frac{\frac{1}{\sqrt{2}}F_f}{l_{eff,f}a_f}\right)^2 + 0^2\right]} &\leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \\ \Rightarrow \sqrt{4\left(\frac{\frac{1}{\sqrt{2}}F_f}{l_{eff,f}a_f}\right)^2} &\leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \\ \Rightarrow 2\frac{\frac{1}{\sqrt{2}}F_f}{l_{eff,f}a_f} &\leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \\ \Rightarrow a_f &\geq \frac{\frac{2}{\sqrt{2}}F_f \beta_w \gamma_{M2}}{l_{eff,f}f_u} \end{aligned}$$

ja

$$\begin{aligned} \sigma_{\perp} &\leq \frac{0.9f_u}{\gamma_{M2}} \\ \Rightarrow \frac{\frac{1}{\sqrt{2}}F_f}{l_{eff,f}a_f} &\leq \frac{0.9f_u}{\gamma_{M2}} \\ \Rightarrow a_f &\geq \frac{\frac{1}{\sqrt{2}}F_f \gamma_{M2}}{l_{eff,f}0.9f_u} \end{aligned}$$

Näin ollen laipan hitsien koko voidaan määrittää kaavalla

$$a_f \geq \max \left(\frac{2F_f \beta_w \gamma_{M2}}{\sqrt{2} l_{eff.f} f_u}, \frac{F_f \gamma_{M2}}{\sqrt{2} l_{eff.f} 0.9 f_u} \right) \quad (57)$$

jossa olevat muuttujat ovat esitettyinä edellä. Koodatussa liitosmitoitushjelmassa on lisäksi vielä kuormien mukaan hitsien kokoa mitoittaessa otettu lisäkerroin $n_{extra} = 1.2$, jotta hitsit eivät tule missään tapauksessa määrääviksi kapasiteetin suhteen.

Uuman hitseihin oletetaan vaikuttavan liitokseen vaikuttava leikkausvoima V kuvan (Kuva 41) mukaisesti. Uuman hitsien tehollinen pituus määritetään palkin uuman suoran osan pituuden mukaan ja voidaan laskea kaavalla

$$l_{eff.w} = 2d_{wb} \quad (58)$$

jossa d_{wb} on palkin uuman suoran osan pituus ja voidaan laskea kaavalla (30) käyttäen palkin tietoja.

Leikkausvoima aiheuttaa leikkausvoiman kantaviin hitseihin leikkausjännityksen

$$\tau_{\perp} = \frac{V}{l_{eff.w} a_w} \quad (59)$$

jonka mukaan hitsin käyttöasteen kaavasta saadaan uuman hitsille johdettua arvo

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} &\leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \\ \Rightarrow \sqrt{0^2 + 3 \left[\left(\frac{V}{l_{eff.f} a_w} \right)^2 + 0^2 \right]} &\leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \\ \Rightarrow \sqrt{3} \frac{V}{l_{eff.f} a_w} &\leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \\ a_w &\geq \frac{\sqrt{3} V \beta_w \gamma_{M2}}{l_{eff.f} f_u} \end{aligned} \quad (60)$$

jossa olevat muuttujat ovat esitettyinä edellä.

Palkin kanssa tasalujaksi mitoitettaessa laippojen sekä uuman hitsien mitoittamisessa käytettiin lähteessä [24] esitettyä standardin SFS EN 1993-1-8 [1] konservatiivista yksinkertaistettuun mitoitusmenettelyyn perustuvaa kaksipuolisen symmetrisen pienahitsin mitoituskaavaa

$$a \geq \frac{\sqrt{3}\beta_w\gamma_{M2}f_y}{2\gamma_{M0}f_u}t \quad (61)$$

jossa β_w korrelaatiokerroin, γ_{M2} on kiinnitysosien osavarmuusluku, γ_{M0} on poikkileikkauksien osavarmuus, f_y ja f_u on liitettävän osan materiaalin myötö- ja murtolujuudet ja t on liitettävän osan paksuus.

Päätylevyn ja palkin välisten hitsien jäykkyyksiksi voidaan valita

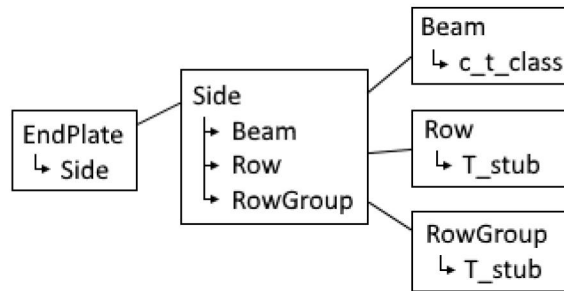
$$k_{19} = \infty \quad (62)$$

Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan hitsit voidaan olettaa olevan huomattavasti muita peruskomponentteja jäykempiä ja niiden vaikutus voidaan jättää kiertymäjäykkyyden laskennassa huomioimatta.

3.7 Liitosmitoitusohjelma

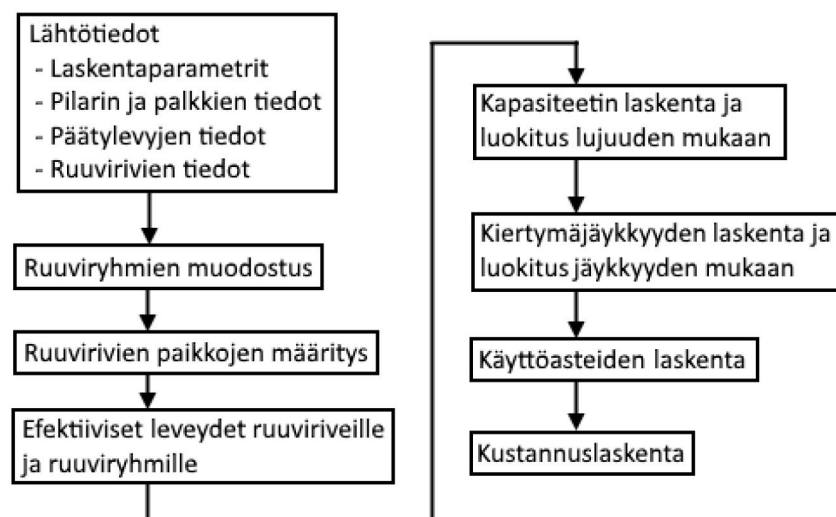
Liitosmitoitusohjelma koodattiin Python ohjelmointikielellä (Python 3), joka on korkean tason tietorakenteita ja käyttäjäystävällisen syntaksin omaava ohjelmointikieli. Pythonin peruseräitä on ohjelmoinnin selkeys sekä avoimuus ja valmiita ilmaisia Python kirjastoja moneen eri tarkoitukseen löytyy paljon. Lisäksi esimerkiksi luokkapohjainen koodaaminen, jota käytettiin liitosmitoitusohjelman tekemiseen, on Pythonissa tehty erittäin helpoksi. Pythonin yksi vahvuuksista on myös se, että python ei vaadi koodin kääntämistä (compiling) ohjelman testaamiseksi pythonin ollessa tulkattava ohjelmointikieli. Tämän myötä Python sopii nopeaan ohjelmointiin sekä ohjelmistokehitykseen ja koodin testaaminen on helppoa ja nopeaa. Tulkattavuuden takia Python kärsii hieman tehokkuudessa muihin käännettäviin kieliin, kuten esimerkiksi C- ja C++-kieliin verrattuna, mutta ero ei ole merkittävä tässä työssä tehtävässä liitosmitoitusohjelmassa. Lisää tietoa ohjelmointikielestä löytyy Pythonin virallisilta sivuilta www.python.org.

Liitosmitoitusohjelma koodattiin luokkapohjaiseksi, jolloin ohjelma on helposti luettava ja muokattavuus on hyvä. Liitos jaettiin pääosiin, jotka sisältävät osakokonaisuuksien tiedot ja liitosmitoitus sekä kustannuslaskenta suoritetaan käyttämällä hyväksi luokkatietorakennetta. Kuvassa alla (Kuva 43) on esitetty liitosmitoitusohjelman jako luokkiin. Koko liitos muodostetaan luokan `EndPlate` avulla ja liitosmitoitus tehdään pilarin molemmille puolille erikseen. Puolien tiedot on koottuna luokkaan `Side`, jonka alla on palkin, päätylevyn, ruuvirivien ja ruuviryhmien tiedot. Palkin tiedot on koottuna aliluokkaan `Beam`, joka sisältää palkin poikkileikkausluokan ja ominaisuuksien määrityksen. Ruuvirivien ja ruuviryhmien tiedot koostetaan luokkiin `Row` ja `RowGroup`, joissa efektiiviset leveydet ovat vielä määritettyinä T-osan tiedot sisältävällä aliluokalla `T_stub`. Peruskomponenttien kapasiteettien ja jäykkyyksien laskenta on hoidettu erillisillä funktioilla, jotka käyttävät liitosmitoitusohjelman luokkien tietoja hyväksi laskennassa.



Kuva 43. Liitosmitoitushjelman luokkajako. Koko liitos jaetaan kahteen osaan eri puolien mukaan. Molemmat puolet sisältävät omat tiedot palkista, ruuviriveistä ja -ryhmistä ja molemmille puolille määritetään sekä kapasiteetti että kiertymäjäykkyys erikseen. Palkki sekä ruuvirivit ja -ryhmät sisältävät lisäksi omat laskentaan tarvittavat komponentit.

Liitosmitoituksen toimintakaavio on esitettyä kuvassa alla (Kuva 44). Liitosmitoitushjelma tarvitsee käyttäjältä alkutietona laskentaparametrit (esimerkiksi palkin liittymiskohdan pilariin, käytettävä kokonaisanalyysimetodi ja koko rakenteen sivusiirryvyys), pilarin ja liittyvien palkkien tiedot, päätylevyjen tiedot ja ruuvirivien tiedot. Tämän jälkeen ruuviryhmät muodostetaan yksittäisten ruuvirivien tietojen avulla ja ruuvirivien sijainnit määritetään molemmille sivuille sekä pilarin että päätylevyn puolelle. Efektiiviset leveydet sekä yksittäisille ruuviriveille että ruuviryhmille muodostetaan seuraavaksi. Liitoksen kapasiteetti ja kiertymäjäykkyys sekä liitosluokitus lujuuden sekä jäykkyyden puolesta tehdään efektiivisten leveyksien määrittämisen jälkeen, kun kaikki peruskomponenttien laskentaan tarvittavat tiedot on saatu koottua. Lopuksi ohjelma vielä laskee liitoksen käyttöasteen taivutukselle sekä leikkaukselle ja määrittää liitoksen kokonaiskustannukset liitoksen tietojen perusteella. Liitosmitoituksen tiedot voidaan esittää mitoituksen jälkeen sekä tekstinä että kuvina.



Kuva 44. Tehdyn liitosmitoitushjelman toimintakaavio.

4. KUSTANNUSLASKENTA

Teräsrakenteiden kustannukset muodostuvat monen tekijän yhteisvaikutuksesta ja tarkka kustannusten määrittäminen saattaa olla hankalaa. Rakenteen kokonaiskustannuksiin vaikuttavat suunnittelukustannukset, valmistus- ja materiaalikustannukset sekä siirto- ja pystytyskustannukset, joten muuttujia on paljon. Kustannustekijöistä rakenneosien materiaalikustannukset saadaan muihin verrattuna yleensä määritettyä suhteellisen helposti, sillä materiaalikustannukset ovat helposti saatavilla valmistajilta, mutta esimerkiksi valmistuskustannusten arvioiminen on hankalampaa. Kuitenkin varsinkin liitoksilla valmistuskustannukset ovat yleensä merkittäviä ja ne tulisi ottaa kustannusten määrittämisessä huomioon. Siirto- ja pystytyskustannukset jätetään kustannuslaskennassa usein huomioimatta, sillä ne ovat hyvin projektiriippuvaisia.

Evers ja Maatje esittävät, että suunnittelukustannukset muodostavat noin 13 % kokonaiskustannuksista. Suunnitteluvaiheen vaikutus rakenteen kokonaiskustannuksiin on myös selvä, sillä Eversin ja Maatjen mukaan jopa 88 % kokonaiskustannuksista määräytyy suunnitteluvaiheessa tehtyjen päätösten mukaan. [25] Näin ollen suunnittelutyön kustannukset tulisi myös huomioida. Suunnittelutyön kustannukset riippuvat kuitenkin suuresti käytetyistä suunnittelumenetelmistä ja suunniteltavasta kohteesta, joten suunnittelukustannukset huomioidaan vain harvoin kustannuslaskennassa.

Useissa rakenteiden kustannusoptimointia käsittelevissä tutkimuksissa rakenteen kustannusoptimi on oletettu muodostuvan rakenteen massan mukaan, kuten tutkimuksissa [26][27]. Kustannusoptimoiduissa rakenteissa osittain jäykkien liitosten valmistuskustannukset vaikuttavat kuitenkin merkittävästi rakenteen kokonaiskustannuksiin ja suurimassa osassa viime aikoina tehdyistä rakenteiden kustannusoptimointia tarkastelevissa tutkimuksissa liitosten kustannukset on otettu huomioon liitosjäykkyyteen suhteutettuna, kuten tutkimuksissa [28][29]. Kyseisellä tavalla liitosten kustannuksia voidaan arvioida hyvin kohteena olevan rakenteen kustannusoptimointiin. Liitosjäykkyyteen perustuvat kustannusfunktiot ovat kuitenkin muodostettu usein vain tietyille liitostyypeille ja liitoskonfiguraatioille ja menetelmä ei ole yleensä kovin helposti yleistettävissä.

Tarkimmat arviot kustannuksista saadaan käyttämällä valmistusvaiheiden kustannukset tarkasti kuvaavia malleja, joilla kustannukset määritetään liitoksen tiedoista. Tällaisia malleja ovat esimerkiksi Pavlovicic et al. [30] sekä Haapion [2] esittämät kustannuslaskentamallit. Kyseiset kustannuslaskentamallit ovat hyvin monipuolisia ja menetelmien vahvuutena on niiden antama lisätieto kustannusten jakautumisesta eri kustannustekijöihin.

Tässä työssä kustannuslaskenta pohjautuu Haapion [2] tekemään tutkimukseen teräsrakenteiden kustannuksista. Lisäksi vertailututkimusta varten työssä on myös huomioitu

tutkimuksessa [8] käytetyt kustannusfunktiot vertailukelpoisten tulosten saamiseksi. Tässä kappaleessa on esitettynä Haapion esittämät kustannusfunktiot. Aiempien tutkimusten vertailussa käytetyt kustannusfunktiot ovat esitettyinä vertailtavassa tutkimuksessa [8].

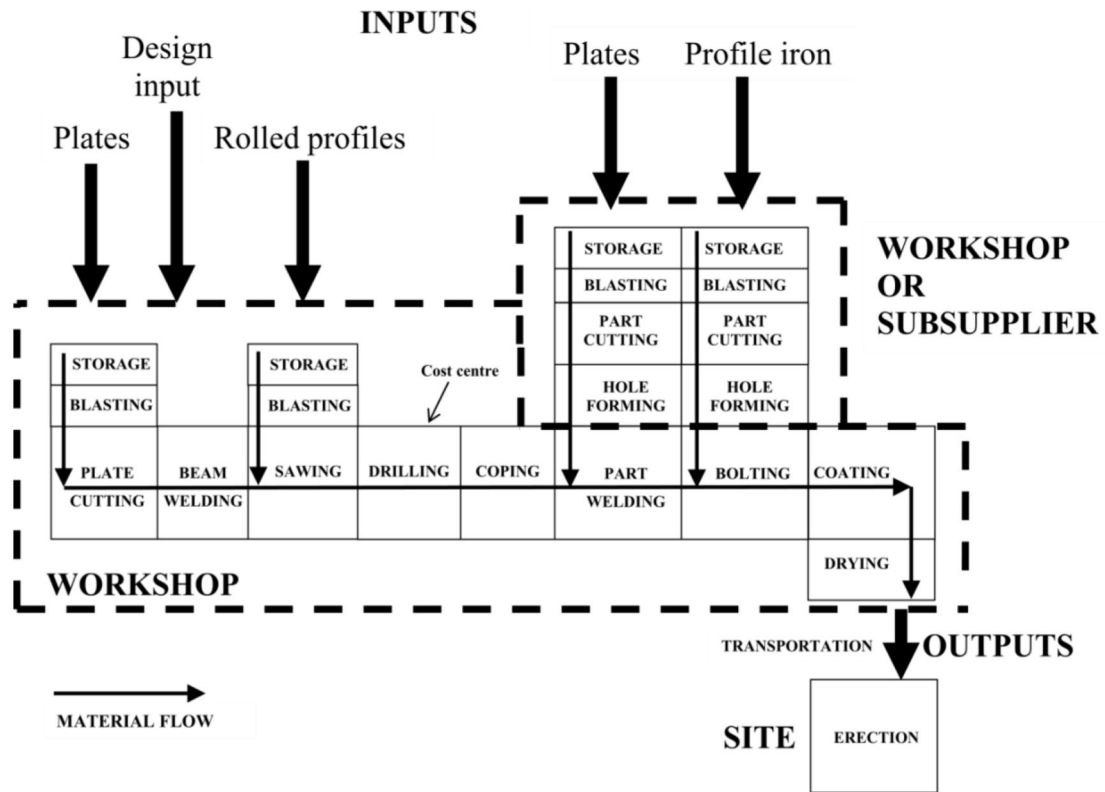
4.1 Kustannusten muodostuminen

Haapion esittämä kustannuslaskenta [2] on jaettuna osakokonaisuuksiin yleiseksi menetelmäksi ja kyseinen menetelmä soveltuu monenlaisten teräsrakenteiden kustannusten määrittämiseen. Esitetyillä kustannusfunktioilla voidaan määrittää kustannukset teräsrakenteisille pilari-palkki rakenteille. Haapio jakaa teräsrakenteiden kustannuksen valmistuskustannuksiin, siirtokustannuksiin ja pystytyskustannuksiin. Tässä työssä otetaan huomioon kuitenkin vain huomioon valmistuskustannukset ja sekä siirto- että pystytyskustannukset oletetaan sisällytettäväksi rungon kustannuksiin. Suunnittelukustannuksien arvioimiseen Haapio ei työssään esitä kustannusfunktioita.

Teräsrakenteiden valmistuskustannukset ovat Haapion työssä jaettuna materiaalikustannuksiin ja työvaiheiden kustannuksiin. Materiaalikustannuksissa määritetään rakenteen valmistukseen tarvittavien materiaalien muodostamat kustannukset ja valmistusprosesseissa tarvittavat materiaalit, kuten esimerkiksi hitsausmateriaali, sisällytetään työvaiheiden sisäisiin kustannuksiin. Kustannusfunktioita suunnittelukustannusten huomioimiseksi Haapion työssä ei esitetä.

Haapion esittämät kustannusfunktiot käyttävät pohjoismaiden vuoden 2009 mukaisia materiaali-, väline- ja vuokrahintoja. Lisäksi työvaiheiden kustannustiedot riippuvat suuresti kustannuspaikan tiedoista, kuten laitteistosta, läpimenoajasta ja kustannuspaikan vaatiman tilan hinnasta. Tässä työssä ei kuitenkaan kustannustietoja lähdetä päivittämään, sillä kustannusoptimoinnin puolesta Haapion työssä esitetyt kustannusfunktiot riittävät hyvin kustannusoptimoinnissa tehtäviin yleisempiin vertailututkimuksiin. Tilanteessa, jossa tiedetään konepajan valmistusmahdollisuudet sekä ja kustannusfunktioiden tietoja pystytään tarkentamaan, voidaan optimoinnissa saada huomioitua projektiokohtaiset eroavaisuudet.

Kuvassa alla (Kuva 45) on esitettynä Haapion työssä esitetty materiaalin kulun periaatekuva valmistuksessa. Kuvassa päätylevyliitosten valmistus seuraa kuvan oikealla puolella esitettyä ”Plates” kohdan työvaiheiden kulkua, jossa päätylevy geometria ensin valmistellaan liitoksen tietojen mukaan, seuraavaksi hitsataan kiinni liittyvään profiiliin ja lopuksi tarkastetaan sekä maalataan.



Kuva 45. Materiaalin kulku työvaiheiden läpi ([2], kuva 8). Tässä työssä päätylevyliitosten kustannuslaskennassa kustannuksissa huomioidaan vain liitoksen osien sekä työvaiheiden kustannukset ja rakennneosien, kuten pilarien ja palkkien, kustannuksia ei huomioida.

Haapio jakaa työvaiheet 12:ä osaan ja Haapio esittää kokonaiskustannusten laskentaan kustannusfunktioita

$$C_T = C_{SM} + C_B + C_{Cu} + C_{BW} + C_S + C_D + C_{Co} + C_{PF} + C_{PA} + C_{PT} + C_P + C_{Tr} + C_E \quad (63)$$

jossa C_{SM} on materiaalikustannukset, C_B on hiekkapuhalluskustannukset, C_{Cu} on leikkauskustannukset, C_{BW} on hitsatun palkin tai pilarin hitsauskustannukset, C_S on palkin mittaan leikkaamisen kustannukset, C_D on palkin ja pilarin reikien poraamiskustannukset, C_{Co} on viisteiden tekokustannukset, C_{PF} on pienempien osakokonaisuuksien valmistuskustannukset, C_{PA} on osien liittämiskustannukset, C_{PT} on jälkitarkastuskustannukset, C_P on maalauskustannukset, C_{Tr} on siirtokustannukset ja C_E on pystytyskustannukset.

Päätylevyliitosten kokonaiskustannuksiin otettiin tässä työssä mukaan materiaalikustannukset C_{SM} , hiekkapuhalluskustannukset C_B , levyn kokoon leikkaus- ja ruuvireikien leikkauskustannukset C_{Cu} , päätylevyn hitsauskustannukset C_{PA} , jälkikäsittely (tarkastus) kustannukset C_{PT} ja maalauskustannukset C_P . Huomion arvoista on, että päätylevy ruuvien reiät tehdään leikkaamalla ja myös pilarin laipan reikien teko on huomioitu leikkauskustannuksissa. Pilarin laippojen ruuvien reiät tehdään todellisuudessa palkin muiden reikien teon yhteydessä poraamalla ja kyseiset porauskustannukset tulisi ottaa huomioon

pilarin kustannuksissa. Tässä työssä reikien teko on kuitenkin otettu huomioon liitoksen kustannuksiin, sillä työssä keskitytään vain liitosten kustannuksiin ja koko kehän kustannuksiin ei oteta kantaa.

4.2 Materiaalikustannukset

Materiaalien kustannuksina on käytetty Haapion työssä esitettyjä taulukoituja kustannustietoja. Päätylevyn materiaalikustannukset muodostuvat päätylevyn koon ja materiaalin mukaan ja ruuvien, mutterien ja aluslevyjen kohdalla käytettiin esitettyjä hintataulukoita. Hintatiedot ovat Haapion työn mukaisesti vuoden 2009 Suomen hintatietojen mukaisia, mutta tiedot voidaan olettaa vastaavan nykytilanteen hintatietoja tarvittavalla tarkkuudella.

Päätylevyn teräslevyn materiaalikustannus voidaan laskea kaavalla

$$C_{SM,plate} = W_{SMPl}(C_{SMBP} + C_{SMG} + C_{SMT} + C_{SMQ} + C_{SMQT} + C_{SMUT}) \quad (64)$$

jossa W_{SMPl} on levyn paino, C_{SMBP} on materiaalin perushinta, C_{SMG} on materiaalilaadun mukainen lisä, C_{SMT} on levyn paksuuslisä, C_{SMQ} on levymäärälisä, C_{SMQT} on levynpaksuuden levymäärän lisä ja C_{SMUT} on ultraäänitarkastuslisä. Tässä työssä on keskitytty yksittäisen liitosten kustannusoptimointiin, joten lisäkertoimet C_{SMQ} ja C_{SMQT} ovat jätetty huomioimatta. Lisäksi levyn ultraäänitarkastuksen lisää C_{SMUT} ei ole huomioitu. Koko rakenteen tarkastelussa arvot tulisi kuitenkin ottaa huomioon, sillä koko rakenteessa materiaalmäärät ovat usein suuria ja määrälliset voivat vaikuttaa huomattavasti lopullisiin kustannuksiin.

Ruuvien, mutterien sekä aluslevyjen materiaalikustannukset voidaan laskea kaavalla

$$C_{SM,bolts} = \sum_{i=1}^{dl} n_i (C_{Bi} + C_{Ni} + C_{wi}) \quad (65)$$

jossa dl on liitoksen eri ruuvikokojen määrä, n_i on tiettyä ruuvikokoa olevien ruuvien määrä, C_{Bi} on ruuvien yksikköhinta, C_{Ni} on mutterien yksikköhinta ja C_{wi} on aluslevyjen yksikköhinta. Ruuvien, mutterien ja aluslevyjen käytetyt hintataulukot ovat esitettyinä liitteessä B.

4.3 Työvaiheiden kustannukset

Työvaiheiden kustannukset [€] määritettiin Haapion työssä esitetyllä kaavalla

$$C_k = (T_{Nk} + T_{Pk})(C_{Lk} + C_{Eqk} + C_{Mk} + C_{REk} + C_{Sek})/u_k + T_{Pk}(C_{Ck} + C_{Enk}) + C_{ck} \quad (66)$$

jossa T_{Nk} on työvaiheen tuottamaton aika, T_{Pk} on työvaiheen tuottava aika, c_{Lk} on työntekijöiden palkkojen yksikkökustannus, c_{Eqk} on laitteistokustannukset, c_{Mk} on laitteiston huoltokustannukset, c_{REk} on työalueen ostokustannukset, c_{Sek} on työalueen ylläpitokustannukset, c_{Ck} on ajasta riippuvien ja C_{ck} on ajasta riippumattomien kulutustavaroiden kustannukset ja c_{Enk} on energiakulutuksen aiheuttamat kustannukset. Kaikilla työvaiheilla käytettiin käyttöasteena $u_k = 1.0$. Muuttujissa alaviite k viittaa tarkasteltavaan työvaiheeseen.

Kustannusfunktiossa (66) esimerkiksi esitetyt ostettujen käyttölaitteiden kustannukset c_{Eqk} sekä työvaiheen vaatiman alueen ostokustannukset c_{REk} voidaan ottaa huomioon sijoituksen kuoletustekijällä

$$A_{vs} = P_{vs} \left[\frac{i_{vs}(1 + i_{vs})^{n_{vs}}}{(1 + i_{vs})^{n_{vs}} - 1} \right] \quad (67)$$

jossa A_{vs} on vuotuinen sijoituksen aiheuttama menoerä, P_{vs} on alkuperäinen sijoitettu summa, i_{vs} on korkoprosentti ja n_{vs} takaisinmaksuaika vuosissa.

Kaikki tarkasteltujen työvaiheiden kustannusten määrittämiseen tarvittavat kustannustiedot ovat esitettyinä kappaleissa alla ja liitteessä B. Liitteessä B on esitettyinä kaikille työvaiheille yksikkökustannukset liitoksen riippumattomille kustannustekijöille, kuten työntekijöiden palkkojen yksikkökustannukset ja työalueen osto ja ylläpitokustannukset. Seuraavissa kappaleissa on esitettyinä liitoksen tietojen vaikutuksen huomioiminen liitoskustannuksiin. Liitoksen tietojen mukaan saadaan muun muassa työvaiheen kesto, työvaiheen käyttötavarakustannukset sekä energian kulutuksen aiheuttamat kustannukset. Kustannuslaskennan tarkemmat tiedot ovat esitettyinä lähteessä [2].

4.3.1 Levyn hiekkapuhallus

Hiekkapuhallukseen liittyvinä ominaistietoina ovat puhallukseen kuluva aika, energian kulutus sekä puhallusmateriaalin kustannukset. Työvaiheen kustannukset voidaan laskea kaavalla

$$C_B = T_{PB}(c_{LB} + c_{EqB} + c_{MB} + c_{REB} + c_{SeB})/u_B + T_{PB}(c_{CB} + c_{EnB}) \quad (68)$$

jossa olevat muuttujat on esitetty edellä kaavan (66) yhteydessä. Alaviite B viittaa hiekkapuhallukseen (blasting). Liitoksen tiedoista riippumattomat arvot ovat esitettyinä liitteessä B.

Hiekkapuhallukseen kuluva tuottava aika saadaan määritettyä puhallettavan kappaleen maksimi dimensioiden mukaan kaavalla

$$T_{PB} = \frac{L_B}{v_c} \quad [min] \quad (69)$$

jossa L_B on puhallettavan osan maksimi dimensio (päätylevyn korkeus tai leveys) ja v_c on hiekkapuhalluskoneen kuljettimen nopeus. Haapio olettaa työssään kuljettimen nopeudeksi $v_c = 3000 \text{ mm/min}$.

4.3.2 Levyn leikkaus

Levyn leikkauksen liittyvät ominaistiedot ovat leikkauspituus, leikkausaika, energian kulutus ja leikkauksen käyttömateriaalien kustannukset. Työvaiheen kustannukset voidaan laskea kaavalla

$$C_{Cu} = (T_{NCu} + T_{PCu})(c_{LCu} + c_{EqCu} + c_{MCu} + c_{RECu} + c_{SeCu})/u_{Cu} \quad (70) \\ + T_{PCu}(c_{CCu} + c_{EnCu})$$

jossa olevat muuttujat on esitetty edellä kaavan (66) yhteydessä. Alaviite Cu viittaa levyn leikkaamiseen (cutting). Liitoksen tiedoista riippumattomat arvot ovat esitettyinä liitteessä B.

Levyn leikkauksen tuottamattomaksi ajaksi Haapio esittää $T_{NCu} = 3 \text{ min}$, joka ottaa huomioon työvaiheen alkutoimet, leikkauspään siirtoajan ja sytys- sekä alkulämmitysajan. Levyn leikkaukseen kuluva tuottava aika, T_{PK} , riippuu leikkaustavasta ja Haapio esittää funktiot leikkauksenopeuden määrittämiselle plasma- ja polttoleikkaukselle. Haapion mukaan plasmaleikkauksella pystytään leikkaamaan 30 mm levynpaksuuteen saakka, jonka jälkeen joudutaan käyttämään polttoleikkausta. Leikkausajat saadaan määritettyä kaavalla

$$\text{Plasmaleikkauksessa} \quad (71) \\ T_{PCu} = L_{Cu}/(8.9212t^2 - 486.87t + 8155.8) \quad [min]$$

$$\text{Polttoleikkauksessa} \\ T_{PCu} = L_{Cu}/(-4.1939t + 658.67) \quad [min]$$

jossa L_{Cu} [mm] on leikkauspituus ja t [mm] on levyn paksuus. Kyseiset kaavat ovat leikkauksenopeustestien tuloksiin tehtyjä sovitteita.

Levyn leikkauksessa käyttötavaran kuten leikkauspäiden ja kaasun kustannukset voidaan ottaa huomioon kaavalla

$$\begin{aligned} &\text{Plasmaleikkauksessa} \\ c_{CCu} &= 0.38 \quad [\text{€/min}] \end{aligned} \quad (72)$$

$$\begin{aligned} &\text{Polttoleikkauksessa} \\ c_{CCu} &= 0.22 + (0.00001t^2 + 0.001t + 0.0224)4.18 \quad [\text{€/min}] \end{aligned}$$

jossa t on leikattavan levyn paksuus.

4.3.3 Hitsaus

Hitsaukseen liittyvät ominaistiedot ovat pienahitsien pituudet ja koot, hitsausaika, energiakulutus ja hitsauksen käyttömateriaalien kustannukset. Työvaiheen kustannukset voidaan laskea kaavalla

$$\begin{aligned} C_{PA} = T_{PPA}(c_{LPA} + c_{EqPA} + c_{MPA} + c_{REPA} + c_{SePA})/u_{PA} + T_{PPA}c_{EnPA} \\ + C_{CPA} \end{aligned} \quad (73)$$

jossa olevat muuttujat on esitetty edellä kaavan (66) yhteydessä. Alaviite PA viittaa liitoksen kokoamisen (part assembly). Liitoksen tiedoista riippumattomat arvot ovat esitettyinä liitteessä B.

Hitsausnopeus riippuu hitsin a-mitasta ja hitsisauman tyylistä. Pienhitsin hitsaukseen kuuluva aika saadaan määritettyä Haapion mukaan kaavalla

$$T_{Pfw} = \frac{L_{fw}}{1000} (0.4988a^2 - 0.0005a + 0.0021) \quad [\text{min}] \quad (74)$$

jossa L_{fw} [mm] on hitsattava pituus ja a [mm] on hitsin a-mitta. Lisäksi hitsauksen tuotetaan kokonaisaikaan, T_{PPA} , tulee Haapion mukaan huomioida osan alustava pistehitsaus paikalleen. Haapio olettaa kustannusfunktioissa kolmen pistehitsin riittävän osan paikallaan pitämiseksi ja esittää pistehitsaukseen meneväksi ajaksi $T_{PTA} = 1.59$ [min]. Näin ollen kokonaishitsausaika saadaan kaavalla

$$T_{PPA} = T_{Pfw} + T_{PTA} \quad [\text{€}] \quad (75)$$

jossa T_{Pfw} ja T_{PTA} ovat esitettyinä edellä.

Haapio olettaa hitsaustavaksi kokoonpanossa MAG M-hitsauksen (metal arc welding with mixed gas), joka kuluttaa hitsauksessa sekä hitsauslankaa että hitsauksessa käytettävää suojakaasua. Tässä työssä päätylevyn hitsit oletetaan pienahitseiksi, jolloin Haapion mukaan hitsauksen käyttötavaran kustannukset voidaan laskea kaavalla

$$C_{cPA} = 4.98475 * 10^{-5} L_{fw} a^2 \quad [€] \quad (76)$$

jossa L_{fw} [mm] on hitsattava pituus ja a [mm] on hitsin a-mitta.

4.3.4 Jälkitarkastus

Jälkitarkastukseen kuuluu tehtyjen hitsien tarkastaminen ja jäysteiden poisto. Tässä työssä jäysteiden poistoa ei ole otettu huomioon ja vain hitsien tarkastaminen on otettu huomioon. Työvaiheen kustannukset voidaan laskea kaavalla

$$C_{PT} = T_{PPT}(C_{LPT} + C_{REPT} + C_{SePT})/u_{PT} \quad (77)$$

jossa olevat muuttujat on esitetty edellä kaavan (66) yhteydessä. Alaviite PT viittaa jälkitarkastukseen (post treatment). Liitoksen tiedoista riippumattomat arvot ovat esitettyinä liitteessä B.

Tarkastamisen kustannukset muodostuvat tarkastustavasta riippuen hitsien pituuden mukaan, kun jäysteiden poisto jätetään ottamatta huomioon. Haapio esittää työssään tarkastusnopeudet ultraäänitarkastukselle (UT) ja magneettipartikkelitarkastukselle (MT) ja visuaalisen tarkastuksen (VT) oletetaan pystyvän tehdä muiden työvaiheiden lomassa aiheuttamatta lisäkustannuksia. Tarkastukseen kuluva aika saadaan määritettyä tarkastettavien hitsien pituuksien mukaan kaavalla

$$T_{PPT} = L_{UT}T_{UT} + L_{MT}T_{MT} \quad [min] \quad (78)$$

jossa L_{UT} on ultraäänitutkittavien hitsien pituus ja L_{MT} on magneettipartikkelitarkastettavien hitsien pituus. Tarkistusmenetelmien nopeudet ovat esitettyinä taulukossa alla ().

Taulukko 7. Hitsien tarkastusnopeudet eri tarkastustavoilla.

Tarkastustapa	Hitsien tarkastusnopeus [min/mm]
Ultraääni (UT)	0.06
Magneettipartikkeli (MT)	0.015

4.3.5 Maalaus

Maalaukskustannuksissa huomioidaan maalaukseen kuluva tuottava aika, maalaustarvikkeet sekä käytetty maali ja maalauksen vaatima tila. Työvaiheen kustannukset voidaan laskea kaavalla

$$C_P = T_{PP}(C_{LP} + C_{REP} + C_{SeP})/u_P + C_{CP} \quad (79)$$

jossa olevat muuttujat on esitetty edellä kaavan (66) yhteydessä. Alaviite P viittaa maalaukseen (painting). Liitoksen tiedoista riippumattomat arvot ovat esitettyinä liitteessä B.

Maalauksen kustannustiedot riippuvat käytettävästä maalista ja Haapio esittää työssään kustannusfunktiot alkydi-, epoksi-, polyuretaani- ja akryyli-maalien käytölle. Jokaisella kyseisistä maaleista on omat vaatimuksensa ja kustannusten koostumisessa otetaan huomioon muun muassa maalauspinta-ala, maalikerrosten määrä sekä vaadittu maalikerroksen paksuus ja hukkamaali. Maalaus aika eri maaleilla saadaan Haapion mukaan määritettyä kaavoilla

$$T_{PP} = \frac{0.513}{900000} A_p \quad [min] \quad \text{alkydi} \quad (80)$$

$$T_{PP} = \frac{0.481}{900000} A_p \quad [min] \quad \text{epoksi}$$

$$T_{PP} = \frac{0.352}{900000} A_p \quad [min] \quad \text{polyuretaani}$$

$$T_{PP} = \frac{0.522}{900000} A_p \quad [min] \quad \text{akryyli}$$

jossa A_p on maalattava pinta-ala.

Itse käytetyn maalin aiheuttamat materiaalikustannukset voidaan Haapion mukaan määrittää eri maaleille kaavoilla

$$C_{ck} = 4.17 * 10^{-6} A_p \quad [€] \quad \text{alkydi} \quad (81)$$

$$C_{ck} = 4.39 * 10^{-6} A_p \quad [€] \quad \text{epoksi}$$

$$C_{ck} = 4.79 * 10^{-6} A_p \quad [€] \quad \text{polyuretaani}$$

$$C_{ck} = 5.53 * 10^{-6} A_p \quad [€] \quad \text{akryyli}$$

jossa A_p on maalattava pinta-ala.

5. KUSTANNUSOPTIMOINTI

Tässä kappaleessa on esitettyä kustannusoptimoinnin tehtävän muodostus ja tiedot. Osassa vertailututkimuksista optimoinnin kohdefunktiona käytettiin liitoksen momenttikapasiteettia tai liitoksen kiertymäjäykkyyttä, mutta optimointi suoritettiin kuitenkin tässä kappaleessa esitettyä kustannusoptimointia vastaavasti.

Tässä työssä tarkasteltiin liitosten kustannuksia ja muun rakenteen kustannuksia ei otettu huomioon. Liitoksen mitoitus ja kokonaiskustannukset määritettiin edellä esitettyjen kustannusfunktioiden mukaisesti ja kustannusoptimoinnin kohdefunktioksi otettiin liitoksen kokonaiskustannusten minimointi. Kustannusten minimoinnista muodostettiin standardimuotoinen optimointitehtävä, jonka muuttujiksi valittiin liitoksen tietoihin helpoiten vaikuttavat parametrit kuten ruuvien paikat, koot ja ruuvirivien määrä. Rajoituksina käytettiin liitoksen kapasiteettia ja liitoksen kiertymäjäykkyyden kohdearvon mukaan saatavia rajoituksia. Lisäksi optimoinnissa huomioitiin tarvittavat standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaiset geometriset reunaehdot sekä liitoksen valmistettavuuden huomioivat reunaehdot. Kustannusoptimointitehtävä standardimuodossa on esitettyä alla.

$$\min \quad C_T(\underline{x}) \quad (82)$$

$$\begin{aligned} s. t \quad & S_{j,min} \leq S_j(\underline{x}) \leq S_{j,max} \\ & M_{j,Rd}(\underline{x}) \geq M_{j,Ed} \\ & e, m \geq \max(1.2d_0, 0.5d_w) \\ & p_{i,i+1} \geq \max(2.2d_0, d_w) \\ & w \geq 2.4d_0 \\ & \eta_{leikkaus}(\underline{x}) \leq 1.0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= \{t_p, e, z_r, d, n_r\} \\ d &\in [12, 16, 20, 24, 30, 36] \\ n_r &\in [1, 2, 3, 4] \end{aligned}$$

jossa olevat muuttujat ovat esitettyinä alla. Lisäksi optimoinnissa on huomioitu liitoskonfiguraatio ylimenevällä päätylevyllä sekä palkin kanssa tasakorkealla päätylevyllä.

5.1 Kohdefunktio

Kohdefunktiona optimoinnissa käytetään liitoksen kokonaiskustannuksia, jotka määritetään liitoksen tietojen perustella kappaleessa 4 esitettyjen kustannusfunktioiden mukaisesti. Kustannusoptimoinnissa tehtävän kohdefunktio on

$$C_T(\underline{x}) \quad (83)$$

jossa C_T on kappaleessa 4 esitetty kaavan (63) mukaan laskettu liitoksen kokonaiskustannus.

Kappaleessa 4 esitettyjä kustannusfunktioita tarkastelemalla voidaan huomata, että liitoksen kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä on ruuvien koko sekä päätylevyn koko, olettaen hitsien määräytyvän suoraan palkin lujuuden mukaan. Kustannusfunktioiden mukaan ruuvien paikka ei suoraan vaikuta kustannuksiin, joten minimi kustannuksia voitaisiin näin ollen tarkastella myös vain ruuvien kokoa ja päätylevyn tilavuutta tarkastellen. Kuitenkin otettaessa tarvittavat rajoitusehdot kiertymäjäykkyydestä ja kapasiteetista huomioon, tarvitaan myös ruuvien paikat kustannusoptimointiin.

5.2 Suunnittelumuuttujat

Liitosten mitoitus komponenttimenetelmällä antaa vapaat kädet valita optimointiin haluttu suunnittelumuuttujat, sillä menetelmä on yleinen. Suunnittelumuuttujien valinta vaikuttaa kuitenkin suuresti optimointitehtävän matemaattiseen rakenteeseen ja optimoinnin hankaluuteen. Päätylevyliitosten luonteesta johtuen optimoinnissa joudutaan ottamaan huomioon jatkuvia sekä diskreettejä muuttujia ja kohdefunktion jatkuvuutta ei voi taata.

Tässä työssä optimoinnin suunnittelumuuttujiksi valittiin seuraavat liitoksen tiedot:

- Päätylevyn paksuus t_p
- Ruuvien reunaetäisyys vapaaseen reunaan nähden e
- Ruuvirivien korkeusasemat z_r
- Ruuvien koot d
- Ruuvirivien määrä n_r

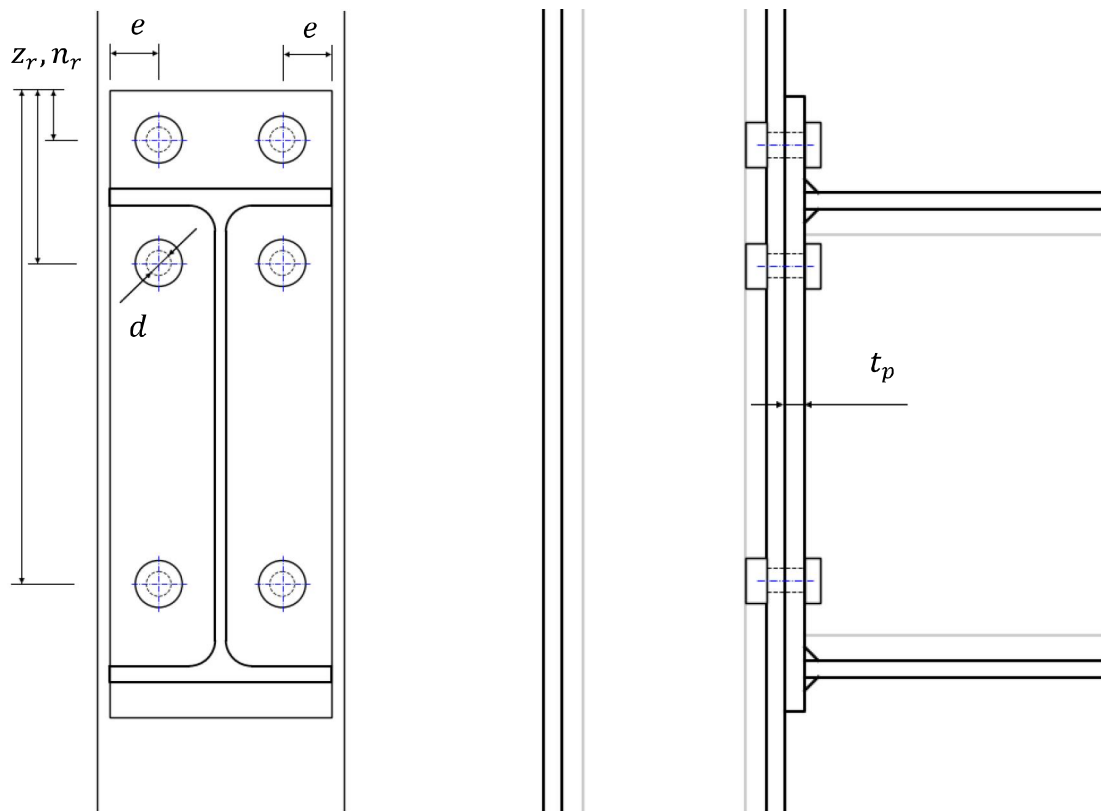
Muut liitoksen mitat johdettiin valituista suunnittelumuuttujista tai määritettiin muiden liitoksen tietojen mukaan. Päätylevyn leveys määritettiin palkin leveyden kanssa yhtä suureksi ja aiempiin tutkimuksiin vertailtaessa vertailtavan optimituloksen kanssa yhtä suureksi. Päätylevyn hitsit määritettiin palkin kanssa tasalujiksi kappaleessa 3.6.9 esitetyn mukaisesti. Päätylevyn alemman ylimenevän osan korkeus määritettiin siten, että pilarin uuman poikittaisessa puristuksessa saadaan aikaiseksi maksimi efektiivinen leveys

$$l_{lo} = \lceil \sqrt{2}a_f + t_p \rceil \quad (84)$$

jossa l_{lo} on pyöristettynä ylöspäin lähimpää millimetriin, a_f on palkin laipan hitsisauman a-mitta ja t_p on päätylevyn paksuus. Tasakorkealla päätylevyllä palkin ylemmän ylimenevän osan korkeutena l_{up} käytettiin samaa edellä esitettyä alemman ylimenevän osan arvoa.

Liitoksen maksimi ja minimi kiertymäjäykkyyden ja momenttikapasiteetin tarkasteluissa päätylevyn ylemmän ylimenevän osan korkeus pidettiin vakiona, jolloin tuloksista saatiin helpommin vertailtavia. Aiempiin tutkimuksiin tehtyjen vertailututkimuksien yhteydessä sekä kiertymäjäykkyyden ja momenttikapasiteetin vaikutusta kustannuksiin tarkasteltaessa päätylevyn korkeus palkin vedetyn laipan yläpuolella rajattiin arvoon $l_{up} = 5d$, missä d on ruvin nimellinen koko. Rajausta tehtiin, sillä muutoin tietyissä tapauksissa palkin vedetyn laipan yläpuolella oleva ruuvirivi saattaa hakeutua niin kauas, että tilankäytöllisesti sekä esteettisesti esim. liitoksen vahvistaminen on mielekkäämpää. Näin ollen päätylevyn ylemmän ylimenevän osan pituutta ei pidetty missään tehdyssä tarkastelussa muuttujana.

Kuvassa alla (Kuva 46) on esitettynä valitut suunnittelumuuttujat. Liitoksen muut tiedot määritettiin alkutietojen tai kyseisten suunnittelumuuttujien avulla.



Kuva 46. Suunnittelumuuttujat liitosoptimoinnissa.

Diskreetit muuttujat, ruuvien koko sekä ruuvirivien määrä, kierrettiin optimoinnissa suorittamalla optimointitehtävät kaikilla eri ruuvikoon ja ruuvirivi yhdistelmille. Ruuvikoina käytettiin $d \in \{12, 16, 20, 24, 30, 36\}$ ja ruuvirivien määrinä käytettiin $n_r \in \{1, 2, 3, 4\}$. Paloittelemalla tehtävä ruuvikoko ja ruuvirivimäärien mukaan osatehtäviin, saatiin optimointi pienempiin osakokonaisuuksiin ja diskreettejä muuttujia ei jouduttu pitää mukana optimoinnin aikana.

Optimoinnissa päätylevyn t_p paksuus pidettiin jatkuvana muuttujana optimoinnin helpottamiseksi, vaikkakin todellisuudessa myös päätylevyn paksuus tulisi olla diskreetti mahdollisten levyn paksuuksien mukaan. Päätylevyn jatkuvuudella ei tehdä kuitenkaan suurta virhettä, sillä eri levynpaksuuksia on saatavilla hyvin. Päätylevyn paksuus rajoitettiin välille $t_p \in [5, 30] \text{ mm}$.

Ruuvirivien paikkojen määräävät arvot reunaetäisyys e ja ruuvirivin korkeusasema z_i rajattiin reunaetäisyyksien rajoitusehtojen avulla ja muuttujien arvot alustettiin rajojen sisältä. Rivien väliset keskiöetäisyydet lisättiin optimointiin rajoitusehtoina. Optimoinnissa rivien aloituspaikat valittiin reunaehdot toteuttavina läheltä palkin vedettyä laippaa. Päätylevyn leveys määritettiin kaikissa tarkasteluissa palkin leveyden mukaan.

5.3 Rajoitusehdot

Rajoitusehtoina optimoinnissa on käytetty liitoksen kapasiteettia, tavoitejäykkyyttä ja liitoksen geometrisia reunaehdoja. Kaikki käytetyt rajoitusehdot määritettiin epäyhtälöillä ja osa rajoitusehdoista normalisoitiin. Normalisoinnilla huomattavasti muita arvoja suuremmat rajoitusehdot, kuten kiertymäjäykkyys jonka tulos laskettiin laskentapohjassa yksikössä Nmm/rad , muutettiin samaan suuruusluokkaan muiden rajoitusehtojen kanssa. Näin ollen kaikilla rajoitusehdoilla pystyttiin käyttämään samoja toleransseja käyvän ratkaisun suhteen. Rajoitusehtojen vaadittuina tarkkuuksina käytettiin 0.0001 yksikköä, eli esimerkiksi geometrinen reunaehto hyväksytty poikkeama annetusta rajoitusehdesta sai optimoinneissa olla maksimissaan 0.0001 mm .

Momenttikapasiteetin rajoitusehtona käytettiin sallittua minimimomenttikapasiteettia, joka määräytyy liitoksen rasituksen mukaan. Liitoksen leikkauskapasiteetin rajoitusehtona käytettiin leikkauksen käyttöastetta, joka ottaa myös huomioon ruuvien veto-leikkaus yhteisvaikutuksen. Momenttikapasiteetin sekä leikkauskapasiteetin rajoitusehdossa käytettiin hyväksi normalisointia, jolla rajoitusehdon suuruusluokka saatiin muiden rajoitusehtojen kanssa samaan suuruusluokkaan. Kyseiset rajoitusehdot ovat esitettyinä alla kaavoissa

$$M_{j.Rd} \geq M_{j.Ed} \quad \Rightarrow \quad 1 - \frac{M_{j.Ed}}{M_{j.Rd}} \geq 0 \quad (85)$$

$$V_{j.Rd} \geq V_{j.Ed} \quad \Rightarrow \quad 1 - \frac{V_{j.Ed}}{V_{j.Rd}} \geq 0 \quad (86)$$

joissa $M_{j.Rd}$ on liitoksen momenttikapasiteetti, $M_{j.Ed}$ on liitoksen suunnittelumomentti, $V_{j.Rd}$ on liitoksen leikkauskapasiteetti, joka ottaa huomioon vedettyjen ruuvirivien veto-leikkaus yhteisvaikutuksen ja $V_{j.Ed}$ on liitoksen suunnitteluleikkausvoima.

Liitoksen tavoitejäykkyydelle annettiin sekä ylä- että alaraja-arvot, joiden välissä optimoidun liitoksen jäykkyys tulee olla. Rajoitusehdon helpottamisella tietyllä välillä pyrittiin pääsemään eroon tilanteesta, jossa optimoinnin käypien ratkaisujen joukko rajoittuu liian rankan yhtäsuuruusehdon myötä. Myös kiertymäjäykkyyden rajoitusehdoissa käytettiin normalisointia rajoitusehdon arvojen skaalaamiseksi pienemmiksi. Käytetyt liitosjäykkyyden rajoitusedot ovat esitettyinä kaavoissa alla

$$S_{j.min} \leq S_j \leq S_{j.max}$$

$$1 - \frac{S_{j.min}}{S_j} \geq 0 \quad (87)$$

$$\frac{S_{j.max}}{S_j} - 1 \geq 0 \quad (88)$$

jossa S_j on liitoksen laskennallinen jäykkyys ja $S_{j.min}$ ja $S_{j.max}$ ovat liitoksen tavoitejäykkyyden minimi- ja maksimi-arvot. Liitosjäykkyyden minimi- ja maksimi-arvot määritettiin alla olevien kaavojen mukaisesti

$$S_{j.min} = (1 - \rho_s)S_{j.target} \quad (89)$$

$$S_{j.max} = (\rho_s - 1)S_{j.target} \quad (90)$$

joissa $S_{j.target}$ on liitoksen tavoitejäykkyys ja ρ_s on sallittu poikkeama tavoitejäykkyydestä prosentteina.

Geometrisina rajoitusehtoina käytettiin ruuvien reuna- ja keskiöetäisyyksiä. Kyseisissä reunaehdoissa otettiin huomioon myös ruuvin kannan keskimääräinen leveys sekä mahdolliset aluslevyt, jolloin optimoinnin tulokset ovat toimivia myös tilankäytön kannalta. Ruuvien reunaetäisyyksien rajoitusehtoina käytettiin

$$e, m \geq \max(1.2d_0, 0.5d_w) \quad (91)$$

joissa e on reunaetäisyys vapaaseen reunaan ja m on reunaetäisyys tuettuun reunaan (pilarin tai palkin laippa/uuma). Kustannusoptimoinnissa kyseiset reunaetäisyydet vapaaseen ja tuettuun reunaan vaakasuunnassa huomioitiin rajoittamalla reunaetäisyyden suunnittelumuuttuja e arvoihin

$$e_{min} \geq \max(1.2d_0, 0.5d_w, 1.2d_0 + b_p - b_c, 0.5d_w + b_p - b_c) \quad (92)$$

$$e_{max} \leq \min[0.5(b_p - t_{wb}) - \max(0.8\sqrt{2}a_w + 1.2d_0, \sqrt{2}a_w + 0.5d_w), \quad (93) \\ 0.5(b_p - t_{wc}) - \max(0.8r_c + 1.2d_0, r_c + 0.5d_w)]$$

jotka ottavat huomioon sekä päätylevyn ja pilarin leveyden ja myös ruuvin kannan halkaisijan. Pystysuunnassa reunaetäisyydet rajattiin ruuvirivien sallituilla arvoilla

$$\textit{Ylimenevä päätylevy} \quad (94)$$

$$z_1 \geq \max(1.2d_0, 0.5d_w)$$

$$z_1 \leq l_{up} - \max(0.8\sqrt{2}a_f + 1.2d_0, \sqrt{2}a_f + 0.5d_w)$$

$$z_{1+i} \geq l_{up} + t_{fb} + \max(0.8\sqrt{2}a_f + 1.2d_0, \sqrt{2}a_f + 0.5d_w)$$

$$z_{1+i} \leq h_p - l_{lo} - t_{fb} - \max(0.8\sqrt{2}a_f + 1.2d_0, \sqrt{2}a_f + 0.5d_w)$$

$$\textit{Tasakorkea päätylevy}$$

$$z_i \geq l_{up} + t_{fb} + \max(0.8\sqrt{2}a_f + 1.2d_0, \sqrt{2}a_f + 0.5d_w)$$

$$z_i \leq h_p - l_{lo} - t_{fb} - \max(0.8\sqrt{2}a_f + 1.2d_0, \sqrt{2}a_f + 0.5d_w)$$

joissa z_i on ruuvirivin i etäisyys päätylevyn yläosasta (Kuva 46). Muuttuja d_0 on ruuvin reiän halkaisija ja d_w on ruuvin kannan keskimääräinen halkaisija, ottaen huomioon myös aluslevyn halkaisijan. l_{up} ja l_{lo} ovat päätylevyn ylimenevien osien pituudet, a_f on päätylevyn laipan hitsin a-mitta ja t_{fb} on palkin laipan paksuus.

Ruuvien keskiövälit rajattiin rajoitusehdoin

$$p_{i,i+1} \geq \max(2.2d_0, d_w) \quad (95)$$

$$w \geq 2.4d_0 \quad (96)$$

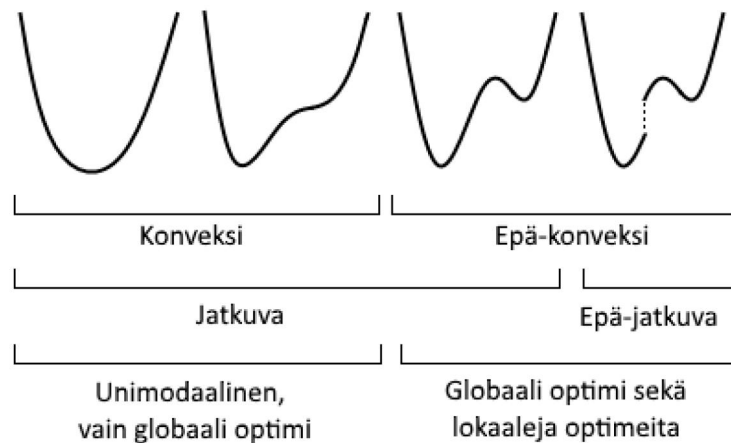
jossa $p_{i,i+1}$ on ruuvirivin i ja $i + 1$ välinen pystysuuntainen keskiöväli ja w on ruuvien välinen keskiöväli vaakasuunnassa.

5.4 Jatkuvuus ja oletukset

Kokonaisuudessaan optimointitehtävä on epälineaarinen ja epäjatkuva, sillä tehtävä sisältää diskreettejä muuttujia. Myöskään tehtävän konveksisuutta ei voida taata koko tarkasteluavaruudessa ja kohdefunktio saattaa sisältää lokaaleja optimeita. Nämä hankaloittavat tehtävän ratkaisemista huomattavasti ja käytännössä vain heuristiset menetelmät sopivat kokonaistehtävän ratkaisemiseen. Tehtävän ratkaisemista voidaan kuitenkin helpottaa kiinnittämällä diskreettien muuttujien arvot ja ratkaisemalla näin saadut jatkuvien muuttujien tehtävät.

Diskreettien muuttujien määrä optimointitehtävässä ei ole suuri, joten tehtävän paloittelu osatehtäviin on toimiva ratkaisu. Diskreettien muuttujien mahdollisia arvoja on ruuvien kokoina 6 kappaletta, ruuvirivien määrinä 4 kappaletta ja lisäksi 2 kappaletta vaihtoehtoja ylimenevän ja tasakorkean päätylevyn tapauksista. Näin ollen osatehtävien määräksi tulee maksimissaan $6 \times 4 \times 2 = 48$ kappaletta eri diskreettien muuttujien yhdistelemillä. Päätylevyn paksuus pidettiin tässä työssä jatkuvana muuttujana, kuten edellä on esitetty. Osatehtäviin jatkuviksi muuttujiksi jäävät siis enää päätylevyn paksuus t_p , ruuvien reunaetäisyys e ja ruuvien korkeusasemat z_r . Kaikki kyseiset muuttujat ovat jatkuvia ja tehokkaalla optimointialgoritmilla optimointi osatehtävissä on kannattavaa.

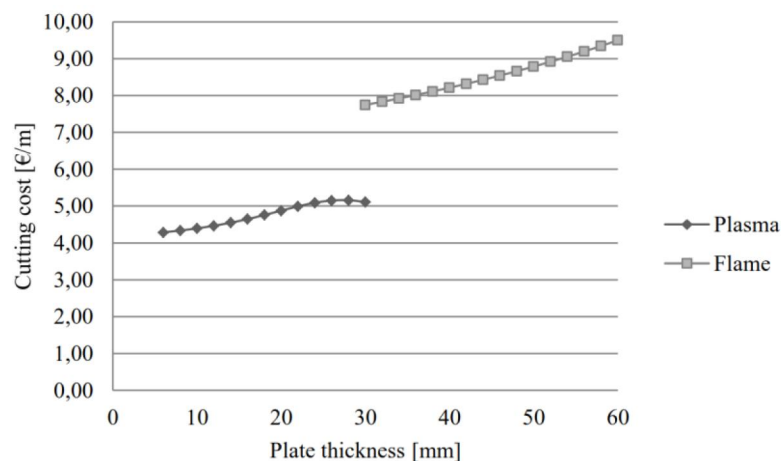
Myös osatehtävät ovat epälineaarisia liitosmitoituksen sekä kustannusfunktioiden taulukkoarvojen myötä. Esimerkiksi liitosmitoituksessa on paljon liitoksen geometriasta riippuvia parametreja, joiden vaikutus liitoksen ominaisuuksiin on epälineaarinen. Osatehtävät voidaan kuitenkin olettaa olevan jatkuvia ja derivoituvia, jolloin myös gradienttipohjaisten menetelmien käyttö on mahdollista. Gradienttipohjaiset menetelmät vaativat kohde- ja rajoitusfunktioiden olevan jatkuvia ja derivoituvia, sillä optimointi seuraa funktioiden gradienttien suurimman muutoksen suuntaa. Lisäksi monet gradienttipohjaiset menetelmät vaativat myös kohde- ja rajoitusfunktioiden derivaattojen olevan jatkuvia. Tässä työssä kohde- ja rajoitusfunktioiden derivaatat lasketaan numeerisesti, koska niille ei ole helppoa saada analyttisiä lausekkeita. Osatehtävien monotonisuutta ei voida myöskään taata, mutta tässä työssä oletettiin gradienttipohjaisten menetelmien hakeutuvan vähintään hyvään lokaaliin optimiin. Kuvassa alla (Kuva 47) on esitettynä esimerkkejä funktion konvekksiudesta, jatkuvuudesta ja lokaaleista minimeistä.



Kuva 47. Funktion ominaisuuksia. Heuristisia optimointimenetelmiä voidaan käyttää kaikissa kuvan tapauksissa, kun taas gradienttipohjaisia menetelmiä pystytään käyttämään vain jatkuvissa ja derivoituissa tehtävissä. Gradienttipohjaiset menetelmät ovat usein heuristisia menetelmiä huomattavasti tehokkaampia, mutta hakeutuvat helposti lokaaliin optimiin.

Kustannusoptimoinnissa liitoksen kustannuksiin vaikuttavat muuttujat ovat ruuvien koot, ruuvirivien määrä ja päätylevyn tilavuus, olettaen hitsauksien määräytyvän palkin lujuuden mukaan tasalujaksi. Näin ollen diskreeteistä muuttujista muodostetuissa osatehtävissä kustannusten osalta ruuvien materiaalikustannukset ja hitsaus sekä jälkitarkastuksen kustannukset ovat jo lukittu. Loput kustannustekijät määräytyvät suoraan päätylevyn mittojen mukaan ja reunaehdot rajaavat käypien ratkaisun joukon. Lisäksi kustannusfunktioita tarkastelemalla voidaan huomata, että ruuvien sijainti päätylevyissä ei vaikuta kustannuksiin ja vain ruuvien koko vaikuttaa levyn leikkauskustannuksiin.

Näin ollen kustannusoptimoinnin osatehtävissä päätylevyn materiaalikustannukset tulevat suoraan päätylevyn tilavuuden mukaan ja levyn hiekkapuhallus, leikkaus ja maalaus-kustannukset muodostuvat suoraan levyn mittojen kautta. Kustannusfunktioita tarkastelemalla nähdään, että levyn materiaalikustannukset ja levyn hiekkapuhallus sekä maalaus ovat konveksit ja aidosti kasvavat/vähenevät päätylevyn mittojen suhteen. Levyn leikkauksen kustannuksissa suuremmilla levyn paksuuksilla, $t_p > 27 \text{ mm}$, kustannukset laskevat hieman plasmaleikkausta käytettäessä ja näin ollen kustannukset eivät ole aidosti kasvavia/väheneviä käytetyllä päätylevyn paksuusvälillä $t_p \in [5, 30] \text{ mm}$. Tämä saattaa sitten johtaa lokaaliin optimiin. Kustannusten lasku suurilla päätylevyn paksuuksilla johtuu kustannusfunktiossa tehdystä sovitteesta (Kuva 48). Kuitenkin lokaali optimi on päätylevyn paksuuden ääripäässä, joka saattaa rajoittua helposti pois optimointitehtävän rajoitusehtojen myötä ja päätylevyn paksuuden järkevällä alkuarvolla voidaan optimoinnin olettaa hakeutuvan hyvään optimiin. Näin ollen kustannusoptimoinnin osatehtävien voidaan olettaa olevan kustannusten suhteen jatkuvia ja kasvavia/väheneviä tarpeeksi laajalla alueella, jotta myös gradienttipohjaisia optimointimenetelmiä voidaan käyttää.

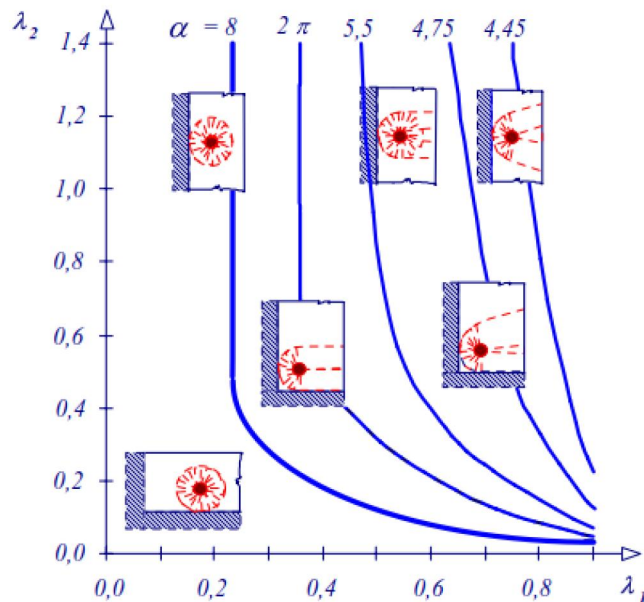


Kuva 48. Levyn leikkauksen kustannukset levyn paksuuden ja leikkaustavan mukaan ([2], s.33). Tehdyissä tutkimuksissa päätylevyn paksuus rajattiin välille $t_p \in [5, 30] \text{ mm}$, jolloin leikkauskustannukset ovat jatkuvat, mutta eivät monotoniset koko tarkasteluvälillä.

Osassa tehdyistä vertailututkimuksista kohdefunktiona käytettiin momenttikapasiteettia tai kiertymäjäykkyyttä. Optimointi suoritettiin myös näissä tapauksissa muodostamalla

kokonaistehtävistä osatehtävät diskreettien muuttujien mukaan. Myös momenttikapasiteetin sekä kiertymäjäykkyyden suhteen osatehtävät ovat epälineaarisia ja konveksisuutta ei voida suoraan taata. Kuitenkin, kuten liitoskustannustenkin kohdalla, osatehtävät voidaan olettaa jatkuviksi osatehtävien tarkasteluavaruudessa.

Momenttikapasiteetin sekä kiertymäjäykkyyden optimoinnin osatehtävissä tärkeimpinä muuttujina ovat päätylevyn paksuus, ruuvirivien korkeusasema ja ruuvien reunaetäisyydet. Kyseiset muuttujat näkyvät ruuvirivien efektiivisten leveyksien laskennassa sekä murtomuotojen määrittämisessä. Liitosmitoituksen kaavojen mukaan voidaan nähdä, että päätylevyn paksuus vaikuttaa päätylevyn taivutukseen, palkin uuman vetoon ja ruuvien reunapuristukseen. Päätylevyn paksuuden vaikutus kapasiteettiin nähden on monotoninen murtomuotojen kapasiteettien ja ruuvien reunapuristuksen mitoituskaavojen mukaan (Kuva 15). Liitoksen jäykkyyteen päätylevyn paksuus vaikuttaa vain päätylevyn taivutuksen jäykkyystermin kautta ja kaavan (40) mukaan voidaan nähdä päätylevyn paksuuden vaikutuksen olevan monotoninen myös jäykkyyden suhteen.



Kuva 49. Reunaetäisyyksien vaikutus myötöviivan muotoon. Ruuvirivin siirtymisen kauemmas tukevilta osilta pienentää rivin tehollista leveyttä. Ruuvirivin vaikutus teholliseen leveyteen voidaan olettaa olevan jatkuva ja monotoninen kuvaajan mukaan [18]

Ruuvien sijaintien vaikutus ei ole yhtä selvä, mutta momenttikapasiteetin ja kiertymäjäykkyyden mitoituskaavojen mukaan voidaan olettaa, että ruuvirivien korkeusasemat sekä reunaetäisyydet vaikuttavat vain T-osien leveyksiin, kun ruuvikoko pidetään vakiona. T-osien efektiiviset leveydet ovat jatkuvia osatehtävien tarkasteluavaruudessa, mutta momenttikapasiteetin ja kiertymäjäykkyyden kasvu/vähentyminen ruuvien sijaintien suhteen ei ole helposti määritettävissä. Voidaan kuitenkin olettaa, että ruuvirivien siirtäminen kauemmaksi tukevasta osasta, kuten palkin uumalta tai laipalta, pienentää ka-

pasiteettia sekä jäykkyyttä. Kyseinen pienennys voidaan siis olettaa olevan suhteessa ruuvien ja jäykistävän osan etäisyyteen. Palkin vedetyn laipan ensimmäisen ruuvirivin tehollisen leveyden määrittämisessä käytetyn α parametrin kuvaajan mukaan tämän vaikutuksen voidaan nähdä olevan jatkuva sekä monotoninen, kuten kuvasta yllä voidaan selvästi nähdä (Kuva 49). Näin ollen ruuvien paikan vaikutus voidaan olettaa olevan jatkuva ja monotoninen kiertymäjäykkyyteen ja momenttikapasiteettiin nähden, jolloin optimointi voidaan suorittaa myös gradienttipohjaisia optimointimenetelmiä käyttäen.

Geometriset rajoitusehdot ovat kaikki lineaarisia osatehtävissä ja ovat siten konvekseja. Kohdefunktio optimointitehtävissä saattaa sisältää tasaisia osia tai lokaaleja optimeita, mutta tässä työssä oletetaan liitoskustannusten, momenttikapasiteetin sekä kiertymäjäykkyyden olevan käytettyjen muuttujien suhteen monotonisia tarkasteluavaruudessa siten, että myös gradienttipohjaisilla menetelmillä päästään hyviin tuloksiin.

5.5 Käytettävä optimointialgoritmi

Kuten edellä kappaleessa 5.4 on esitetty kohdefunktion monotonisuutta ei voida taata koko tarkasteluavaruudessa ja optimointitehtävä saattaa sisältää lokaaleja optimeita. Lisäksi tarkasteluavaruuteen sisältyy diskreettejä muuttujia, jotka tekevät optimointitehtävästä epäjatkuvan ja sekä kohdefunktio että osa rajoitusehdoista ovat epälineaarisia. Kokonaisuudessaan kyseinen optimointitehtävä on erittäin hankala ja käytännössä ainoastaan heuristiset optimointimenetelmät toimivat tehtävän ratkaisemiseen. Tässä työssä tehty optimointitehtävien jako osatehtäviin, jotka ovat jatkuvia, kuitenkin helpottaa tehtävän ratkaisemista ja antaa mahdollisuuden valita optimointialgoritmiksi myös gradienttipohjaisia menetelmiä.

Yleisesti hankalien epälineaaristen, epäjatkuvien ja lokaaleita optimeita sisältävien tehtävien optimoimiseen käypiä optimointialgoritmeja ovat heuristiset menetelmän kuten esimerkiksi geneettiset algoritmit (Genetic Algorithm), parviälyyn perustuvat optimointialgoritmit (Particle Swarm Optimization), eläinten käyttäytymistä matkivat algoritmit (Ant Colony Optimization) ja erilaiset materiaalien käyttäytymistä sekä fysiikan ilmiöitä matkivat mallit (Simulated Annealing, Harmony Search). Heurististen algoritmien käyttö rakenteiden optimoinnissa on todettu olevan hyvä vaihtoehto [31][32]. Kuitenkin geneettisten algoritmien käyttö on ollut suurimmassa suosiossa viime aikoina tehdyissä rakenteiden optimointia tarkastelevissa tutkimuksissa, kuten esimerkiksi tutkimuksissa [33][34][26][28][5]. Heurististen algoritmien käyttö vaikeiden optimointitehtävien ratkaisemiseen on järkevää ja ne ovat yleensä hyvin monikäyttöisiä. Heuristisilla algoritmeilla pystytään usein tarkastelemaan koko tarkasteluavaruutta tehokkaasti ja hyvän ratkaisun löytäminen onnistuu suhteellisen helposti. Heuristisen menetelmän luonteesta johtuen ei samaan tulokseen eri optimointiajoilla kuitenkaan välttämättä päästä ja hyvän tuloksen varmistamiseksi optimointiajoja tulisi tehdä useampi. Heurististen algoritmien huonoina puolina on myös niiden usein vaatima suuri kohdefunktion evaluointien määrä,

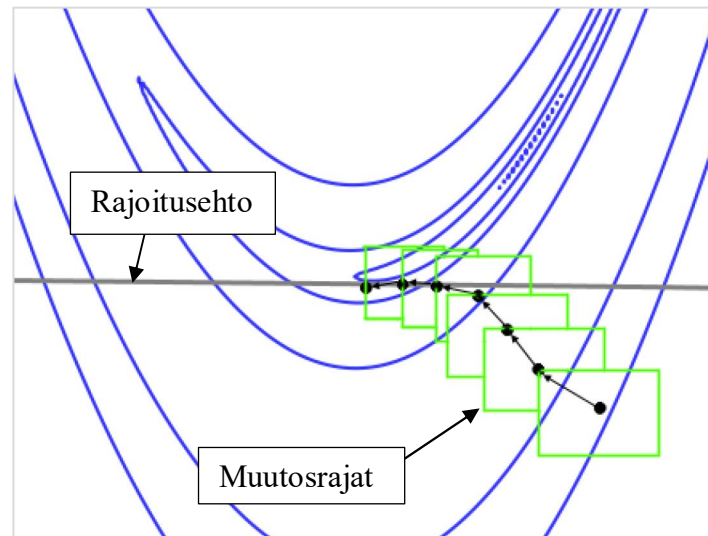
rajoitusehtojen hankalempi lisääminen ja selkeän optimoinnin lopetuskriteerin puuttuminen. Heuristisilla algoritmeilla optimointi lopetetaan usein joko käyttäjän toimesta saavutettaessa tarpeeksi hyvä tulos tai kun optimoinnin tulos ei enää muutu merkittävästi uusilla iterointikierröksillä. Heuristisilla algoritmeilla optimointialgoritmi sisältää usein myös paljon säädettäviä parametreja, jotka saattavat vaikuttaa huomattavasti optimoinnin tehokkuuteen.

Gradienttipohjaisista optimointialgoritmeista tunnetuimpia ja eniten käytettyjä ovat paloittain alitehtävien kautta tehtävää optimoivat iteratiiviset algoritmit (Sequential Quadratic Programming, Generalized Reduced Gradient). Tässä työssä optimointialgoritmiksi valittiin SLSQP (Sequential Least-Squares Programming), joka on numeeristen jatkuvien epälineaaristen tehtävien ratkaisemiseen tarkoitettu gradienttipohjainen optimointialgoritmi. Optimointi suoritettiin valmiin python kirjaston SciPy avulla, johon SLSQP algoritmi on sisällytetty [35]. Käytetyn Python kirjasto SciPy:n SLSQP algoritmi pohjautuu Dieter Kraftin implementoimaan optimointialgoritmiin [36].

SLSQP algoritmin vahvuutena on sen tehokkuus ja nopeus. Gradienttipohjaisena menetelmänä SLSQP hakeutuu optimia kohden gradienttitiedon mukaan ja on siten usein heuristisia menetelmiä nopeampi. Lisäksi menetelmä pystyy käsittelemään hyvin reuna-ehdoja. Huonona puolena SLSQP algoritmissa on sen mahdollinen pysähtyminen lokaaliin optimiin. Epäkonveksien tehtävien yhteydessä kyseisellä algoritmilla ei voida varmistaa globaaliin optimiin saavuttamista, sillä gradienttipohjainen optimointi johtaa tulokset aina tarkastelupisteen ympäristön gradientin mukaista optimisuuntaa kohden. Epäjatkuvuudet ja kohdefunktion tasaiset osat tai paloittain vähenevä ja kasvava vastepinta johtavat helposti lokaaleihin optimeihin. Tässä työssä tehdyissä tutkimuksissa kohde- ja rajoitusfunktioiden monotonisuutta ei voida taata, joten gradienttipohjaisten menetelmien käyttäminen ei välttämättä ole paras vaihtoehto. Kuitenkin kuten edellä kappaleessa 5.4 on esitetty, diskreettien muuttujien mukaan muodostetuissa osatehtävissä kohde- ja rajoitusfunktioiden voidaan olettaa olevan kaikissa tarkasteluissa jatkuvia ja tarkasteluavaruudesta oletetaan gradienttipohjaisella menetelmällä löytyvän vähintään hyvä lokaali optimi.

SLSQP algoritmissa tarkastelupisteen ympäristöä arvioidaan muodostamalla tarkasteltavan pisteen ympäristöstä alitehtävä muutosrajojen sisällä. Kyseistä alitehtävää lähdetään optimoimaan alitehtävän muutosrajojen sisältävän avaruuden testipisteillä ja kohdefunktion sekä rajoitusehtojen gradientit määritetään testipisteistä pienimmän neliösumman mukaisesta sovitteesta. Näin ollen optimointialgoritmi ei suoraan tarvitse kohdefunktion ja rajoitusehtojen gradienttitietoa, vaan gradienttien arvio määrytyy tarkastelupisteen ympäristön mukaan. Tällä vältetään gradienttien suoralta laskennalta ja silti optimoinnin voidaan olettaa liikkuvan tehokkaasti kohti optimia. Käytetyssä SLSQP algoritmissa funktion sovite muodostetaan testipisteiden arvojen mukaan pienimmän neliösumman menetelmällä. Gradienttien arvioinnissa käytettävän aliavaruuden kokona käytettiin $\varepsilon =$

0.05, eli alitehtävän tarkasteluavaruudeksi valittiin $x_i \pm 0.05$. Alla on esitettyä selventävä kuva (Kuva 50) SLSQP algoritmin lähestymisestä optimia kohden alitehtävien avulla.



Kuva 50. SLSQP algoritmin lähestyminen optimia kohden alitehtävien avulla. Optimoinnin askelkoko määräytyy muutosrajojen mukaan. Kuvaaaja vain esimerkki käytetyn optimointialgoritmin toiminnasta, ei todellisesta optimointiajasta.

5.6 Liitosoptimoinnin liittäminen rakenneosien mitoitukseen sekä optimointiin

Liitosten optimoinnin liittämiseen kehän mitoittamiseen ja koko rakenneosien optimointiin on käytännössä kolme selvää toiminnallista tapaa, joissa kaikissa on omat hyvät ja huonot puolensa. Liitosten mitoitus ja optimointi voidaan tehdä rakenneosien mitoituksesta täysin erillään, käyttämällä liitosten alustavaa mitoitusta rakenneosien mitoituksen yhteydessä tai liittää liitosmitoitus täysimittaisena rakenneosien mitoituksen yhteyteen.

Kyseisistä tavoista viimeisin, jossa liitosmitoitus tehdään rakenneosien mitoituksen kanssa yhdessä, kuvaa rakenteen tarkimmin ja siten myös kyseisellä menetelmällä voidaan saada aikaiseksi todellisin kustannusoptimi rakenne. Menetelmä monimutkaistaa kuitenkin rakenteen mitoitusta ja tekee optimoinnista hankalampaa, eikä siten välttämättä ole hyvä ratkaisu jokapäiväisessä insinööriyössä, jossa myös mitoituksen sujuvuus ja toiminnallisuus ovat suuressa osassa. Rakenteen globaalin kustannusoptimin määrittämiseen liitosmitoituksen huomioiminen rakenneosien optimoinnin yhteydessä on kuitenkin periaatteessa ainut vaihtoehto.

Helpon hyvään ratkaisuun koko rakenteen mitoituksessa optimoinnissa päästään perinteisellä mitoitusmenettelyllä mitoittaen ja optimoiden liitokset rakenneosien mitoituksen

jälkeen. Rakenneosien mitoituksessa liitoksista otetaan huomioon vain kiertymisjäykkyys ja liitosten valmistuskustannukset liitosjäykkyyteen perustuen, jolloin liitosten vaikutus rakenteen kuormien jakautumiseen saadaan huomioitua ja myös liitoskustannukset saadaan mukaan kokonaiskustannuksiin. Näin liitosmitoitus sekä optimointi pystytään erottamaan täysin rakenneosien mitoituksesta. Tällöin mitoitus sekä optimointi voidaan tehdä erikseen sekä rakenneosille että liitoksille, joka selkeyttää toimintaa ja helpottaa optimointia. Lisäksi voidaan olettaa menetelmän olevan suhteellisen tehokas verrattuna liitosmitoituksen liittämiseen koko rakenteen optimointiin, sillä mitoitus sekä optimointi ovat huomattavasti selkeämpiä. Huonona puolena menetelmässä on kuitenkin se, että saatu tulos ei luultavimmin ole globaali optimi. Rakenteen kokonaiskustannuksista aiheutuu yleensä noin 10-25 % [5] liitosten valmistuskustannuksista ja jäykkiä liitoksia käytettäessä liitosten valmistuskustannukset saattavat aiheuttaa jopa yli 30 % rakenteen kokonaiskustannuksista [37]. Näin ollen menetelmän tarkkuus, ja siten myös saadun optimirakenteen kustannustehokkuus, riippuu täysin liitoskustannuksien arvioinnissa käytettyjen funktioiden tarkkuudesta.

Liitosten alustavan mitoittamisen yhdistämisen liittämällä rakenneosien mitoittamiseen pystytään liitoksista saamaan arvokasta lisätietoa rakenteen optimointiin ja myös liitosten valmistuskustannuksia voidaan arvioida tarkemmin. Tällä pystytään varmistamaan esimerkiksi liitosten olevan valmistettavissa ilman vahvikkeita, jotka tuova yleisesti valmistuskustannuksia huomattavasti lisää. Huonona puolena menetelmässä on kuitenkin liitosten alustavan mitoituksen vaatima erillinen mitoitusmenetelmä, jota ei välttämättä voida tehdä liitosten lopulliseen mitoittamiseen käytetyllä ohjelmistolla/laskentapohjalla. Usein miten alustavassa mitoituksessa käytetyt kaavat ovat komponenttimenetelmään perustuvia yksinkertaistuksia, kuten lähteissä [3] ja [38] tai empiirisiä malleja, kuten lähteissä [26] ja [39]. Tämä voitaisiin kuitenkin mahdollisesti kiertää jakamalla liitokset liitoskonfiguraation ja vaadittujen kapasiteettien sekä kiertymäjäykkyyksien mukaan ryhmiin ja mitoittamalla vain jokaisen ryhmän määräävin liitos rakenteiden mitoituksen ja optimoinnin yhteydessä. Näin liitosten kustannuksista sekä toimivuudesta voitaisiin olla varmoja ja silti laskenta-aika ei kasvaisi merkittävästi, olettaen liitosmitoitusmenetelmän olevan tehokas.

Kyseisistä menetelmistä käytetyin on rakenneosien mitoituksen ja liitosmitoituksen erottaminen toisistaan ja liitosten valmistuskustannusten arvioiminen rakenneosien mitoituksessa kiertymäjäykkyyteen verrattuna. Tällä tyylillä ei kuitenkaan välttämättä päästä hyvään ratkaisuun ja kustannustehokkaiden rakenteiden mitoittamiseksi liitosten valmistuskustannukset tulisi huomioida mahdollisimman tarkasti.

Perinteisessä mitoitusmenettelyssä liitokset yksinkertaistetaan yleensä nivelellisiksi tai jäykiksi ja osittain jäykkiä liitoksia ei huomioida rakenteen suunnittelussa liitosjäykkyyksien aiheuttaman mitoituksen monimutkaistumisen takia. Liitosten huomioimiseksi rakenneosien mitoituksen yhteydessä on kuitenkin tehty hyvin tutkimusta ja esimerkiksi

Cabreron ja Bayon esittämä menetelmä voisi olla hyvä pohja kustannustehokkaiden rakenteiden mitoittamiseksi jokapäiväisessä suunnittelutyössä [3]. Cabreron ja Bayon kehittämässä menetelmässä rakenteen optimoinnissa lähdetään liikkeelle olettamalla, että optimirakenne saavutetaan käyttämällä yksiaukkoisen palkin tapauksesta saatuja teoreettisia liitosten optimi kiertymäjäykkyyksiä ja liitokset mitoitetaan alustavasti vastaamaan näitä rakenteiden mitoituksen yhteydessä. Rakenteiden mitoitus Cabreron ja Bayon menetelmässä jaetaan käyttörajan ja murtorajan tarkasteluihin, joissa liitokset mitoitetaan alustavasti kiertymäjäykkyyden mukaan käyttörajatilassa ja tarvittavan liitoskapasiteetin mukaan murtorajatilassa. Liitosten lopullinen mitoitus tehdään menetelmässä rakenteiden mitoituksen jälkeen. Kyseisellä tavalla päästään luultavimmin hyvään rakenteeseen perinteiseen mitoitusmenettelyyn verrattuna, vaikka liitosjäykkyydet eivät välttämättä ole globaalin optimin mukaiset.

6. VERTAILUTUTKIMUKSET

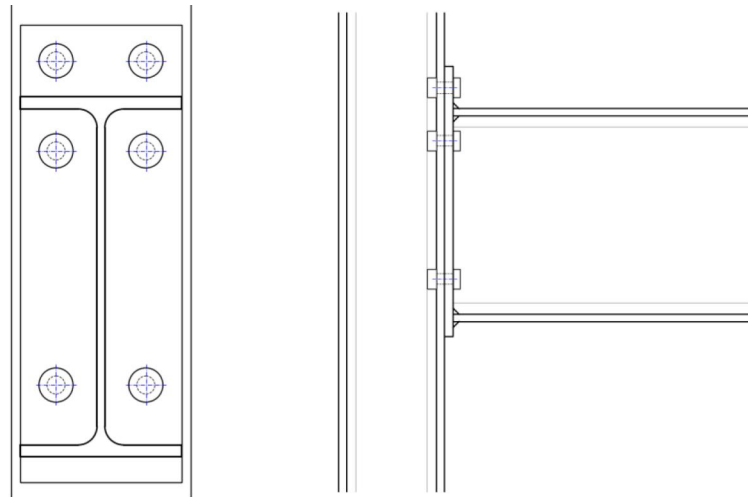
Vertailututkimuksissa tarkasteltiin liitoksen kiertymäjäykkyyden ja momenttikapasiteetin ääriarvoja ja ruuvirivien lisäämisen vaikutuksesta tehtiin erillinen analyttinen tarkastelu. Liitoksen kustannusten koostumista tarkasteltiin eri kiertymäjäykkyyden sekä momenttikapasiteetin arvoilla. Lisäksi komponenttimenetelmän tehokkuutta tarkasteltiin vertaamalla työssä käytettyä menetelmää liitosten kustannusoptimoinnista tehtyyn aiempaan tutkimukseen.

6.1 Kiertymäjäykkyyden ja momenttikapasiteetin ääriarvot

Liitosten kiertymäjäykkyyden ja momenttikapasiteetin ääriarvoja tarkasteltiin yksipuolisella liitoksella ja jatkuvalla pilarilla. Kyseinen liitostyyppi valittiin tarkasteluun, sillä liitos vastaa kehän reunaliitosta, joissa myös pilarin vaikutus näkyy selvästi. Ääriarvojen tarkastelussa liitoksen kuormitukset jätettiin ottamatta huomioon ja vain liitosmitoituksesta saatavia kiertymäjäykkyyden ja momenttikapasiteetin ääriarvoja tarkasteltiin. Optimoititehtävät muodostettiin samaan tapaan kuin kustannusoptimointi, joka on esitettyinä kappaleessa 5. Optimoinnin kohdefunktiona vain käytettiin liitoksen kiertymäjäykkyyttä ja kummallekaan, momenttikapasiteetille tai kiertymäjäykkyydelle, ei asetettu rajoitusehtoja.

Liitoskonfiguraationa pidettiin pidennettyä päätylevyliitosta (Kuva 51), jossa ensimmäinen ruuvirivi on aina palkin vedetyn laipan ulkopuolella. Kyseinen liitosmalli valittiin tarkasteluun, sillä oletettavasti kiertymäjäykkyyden ja momenttikapasiteetin maksimia haettaessa pidennettyä päätylevyä halutaan käyttää hyväksi. Tämän lisäksi kiertymäjäykkyyden ja momenttikapasiteetin miniarvot pystytään saamaan palkin kanssa tasakorkealla päätylevyllä helposti hyvin pieniksi sijoittamalla ruuvirivit mahdollisimman lähelle puristuskeskiötä.

Päätylevyn ylimenevän osan korkeutena käytettiin 100 mm, jolloin eri ruuvikokojen vaikutusta pystyttiin vertailemaan keskenään helpommin. Päätylevyn leveys määritettiin palkin leveyden mukaan ja materiaalina käytettiin terästä S355. Tarkastelussa ruuvien kokoina käytettiin kaikkia peruskokoja välillä M12-M36 ja ruuvirivien määrinä käytettiin 1-4. Minimi ja maksimiarvon määrittäminen tehtiin käyttämällä palkkikokoja IPE 300, IPE 400, IPE 500 ja IPE 600 ja pilariksi valittiin HE 220 B. Sekä pilarin että palkin materiaalina käytettiin terästä S355.

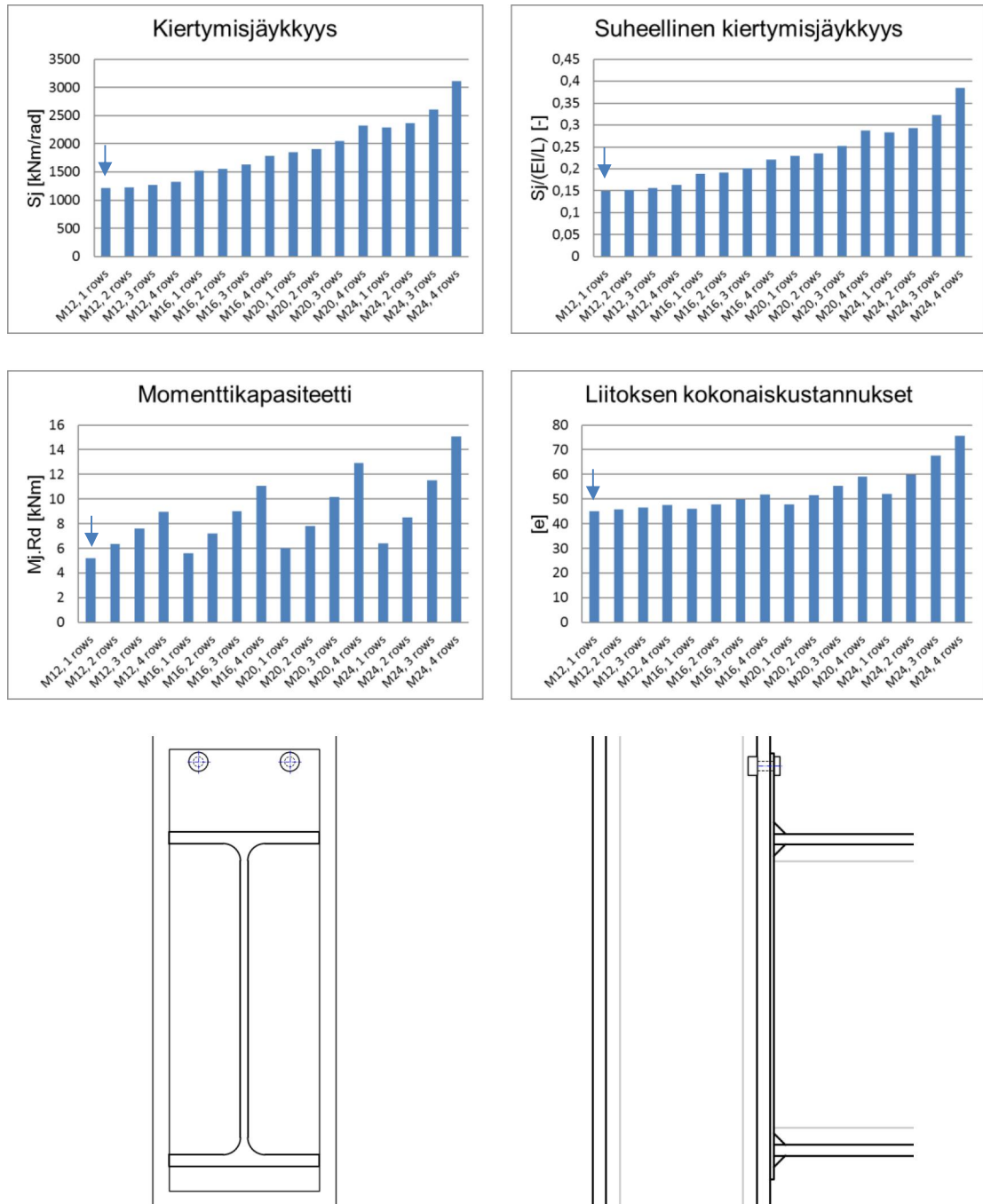


Kuva 51. Esimerkki ylimenevästä päätylevyliitoksesta. Liitoksen maksimi ja minimi momenttikapasiteetin ja kiertymäjäykkyyden tarkastelussa ylimenevän osan korkeudeksi valittiin 100 mm.

Tulosten mukaan kaikilla tarkastelluilla palkkien profiileilla ruuvien koon ja ruuvirivien määrän muuttaminen vaikuttaa liitoksen ominaisuuksiin palkkikoosta riippumatta samalla tavalla. Näin ollen tässä kappaleessa on esitettyä parhaiten havainnot kuvaavat tulokset käyttäen palkilla IPE 400 saatuja tuloksia. Tarkastelujen tulokset ovat esitettyinä kuvissa alla (Kuva 52, Kuva 53).

Tulosten mukaan, kuten voidaan olettaa, kiertymäjäykkyyden minimi saadaan aikaiseksi mahdollisimman ohuella päätylevyllä. Lisäksi tuloksista (Kuva 52) nähdään, että ruuvien koon ja ruuvirivien määrän muuttaminen vaikuttaa huomattavasti liitoksen kiertymäjäykkyyteen. Kuvassa esitetyssä tapauksessa yhdellä ruuvirivillä ruuvien koon muuttaminen koosta M12 kokoon M24 kasvattaa liitoksen minimikiertymäjäykkyyden 1.892 kertaiseksi ja neljällä ruuvirivillä ruuvien koon muuttaminen koosta M12 kokoon M24 kasvattaa liitoksen minimikiertymäjäykkyyden 2.342 kertaiseksi. Suurilla ruuveilla taasen ruuvirivien vaikutus näkyy kiertymäjäykkyydessä selvimmin. M24 koon ruuveilla ruuvirivien määrän kasvattaminen yhdestä neljään kasvattaa minimikiertymäjäykkyyden 1.355 kertaiseksi.

Suurilla ruuveilla kiertymäjäykkyyden arvoon vaikuttaa eniten ruuvien reunaetäisyyksien muuttuminen ja suurella ruuvirivimäärällä kiertymäjäykkyys kasvaa liitoksen sisäisen momenttivarren sekä rivien tuoman jäykkyyden kasvaessa. Samoin käy myös liitoksen minimi momenttikapasiteetin kanssa liitoksen ruuvien määrää lisättäessä. Kuvassa (Kuva 52) esitetystä minimi kiertymäjäykkyyden omaavasta liitoksesta voidaan myös nähdä, että minimi jäykkyys saadaan ruuvien ollessa mahdollisimman kaukana tukevista osista, kuten palkin uumasta ja laipasta. Lisäksi huomion arvoista on, että tarkastelussa kaikilla ruuviko'illa ja ruuvirivimäärillä liitokset saatiin mitoitettua nivelellisiksi. Tämä esittää, että päätylevyn paksuus sekä reunaetäisyydet vaikuttavat merkittävästi liitoksen kiertymäjäykkyyteen.



Kuva 52. Kiertymäjäykkyyden minimiarvot eri ruuvirivien koolla ja ruuvirivimäärillä, kun myös palkin vedetyn laipan yläpuolella on ruuvirivi. Alhaalla esitettyä minimi kiertymäjäykkyyden omaava liitos. Kyseisen liitoksen tiedot esitettyinä pylväskuvaajissa sinisellä nuolella. Minimi kiertymäjäykkyys saavutetaan mahdollisimman pienellä päätylevyn paksuudella ja ruuviriveillä, jotka ovat mahdollisimman kaukana tukevista osista (pilarin ja palkin uuma sekä palkin vedetty laippa). Huomion arvoista tuloksissa on, että myös ylimenevällä päätylevyllä liitos pystytään saamaan nivelelliseksi.

Kuvasta (Kuva 52) nähdään myös, että ruuvien koon suurentaminen ja ruuvirivien määrän lisääminen kasvattavat liitoksen kustannuksia. Varsinkin suuret ruuvit lisäävät kustannuksia huomattavasti. Ruuvirivien lisääminen kasvattaa liitoskustannuksia lähes suoraan

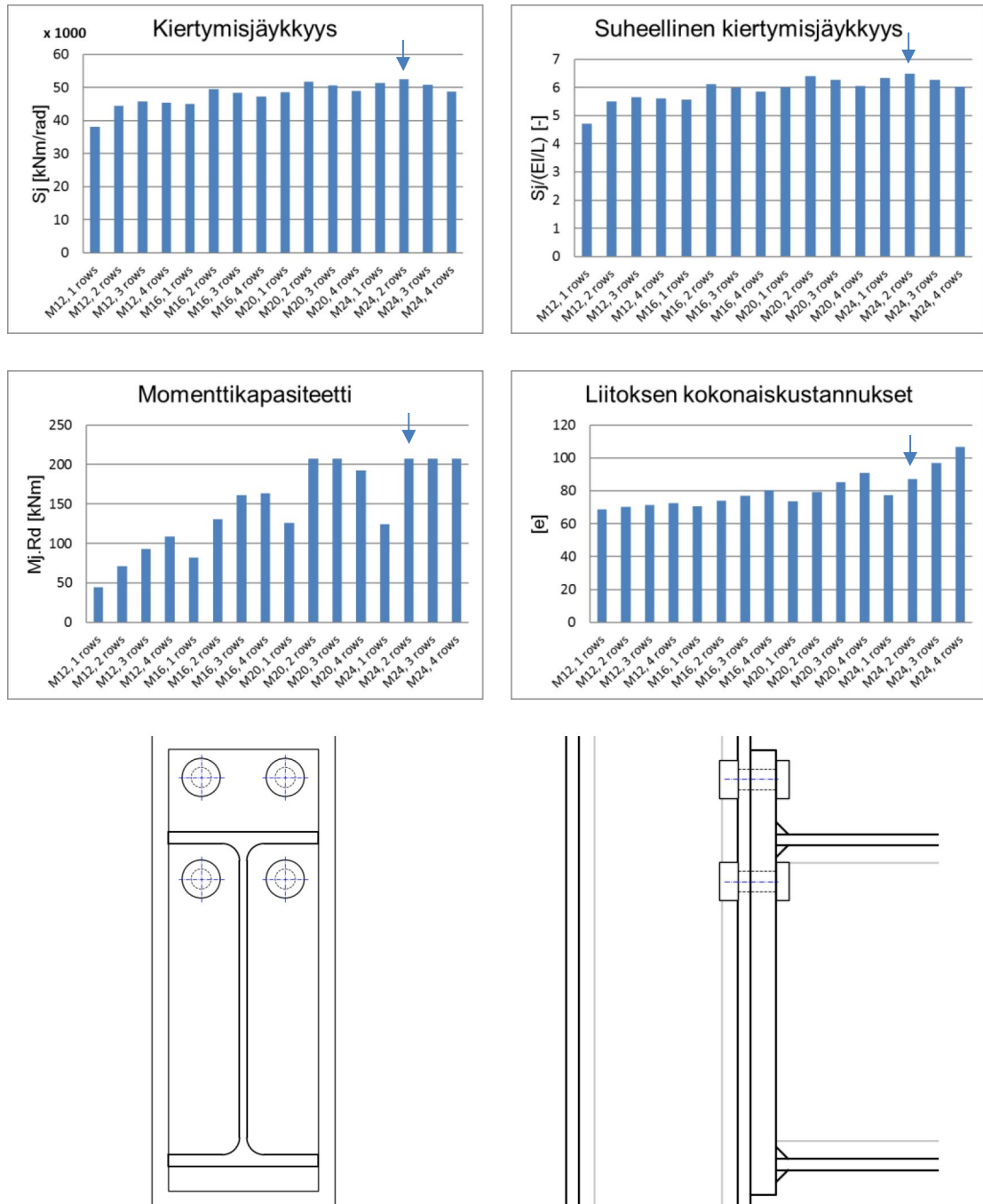
rivien määrän ja ruuvien hinnan mukaan, kun ruuvikoko pidetään samana. Esimerkiksi kolmella ruuvirivillä liitoskustannukset ovat hyvin lähellä samaa, kuin liitoskustannukset yhdellä ruuvirivillä + kahden ruuvirivin tuoma lisäkustannus. Myös ruuvien koon muuttaminen eri ruuvirivimäärillä kasvattaa liitoskustannuksia lähes suoraan ruuvien hintojen mukaan. Esitetyssä tapauksessa ruuvikokoon muuttaminen koosta M12 kokoon M24 yhdellä ruuvirivillä liitoskustannukset kasvavat noin 15 % ja neljällä ruuvirivillä noin 60 %. Kyseinen kustannusten kasvu aiheutuu lähes yksinään isompien ruuvien suuremmasta hinnasta.

Liitoksen kustannusten puolesta pientä kiertymäjäykkyyttä tai momenttikapasiteettia tavoitellessa liitos kannattaa suunnitella käyttäen vain yhtä ruuviriviä mahdollisimman pienellä päätylevyn paksuudella ja ruuvikoolla. Yhtä ruuviriviä käytettäessä tulee kuitenkin varmistaa, että liitoksen leikkauskapasiteetti on riittävä. Vaikka ylimenevällä päätylevyläkin pystytään liitos saamaan nivelelliseksi, ei sen käyttö ole kuitenkaan järkevää.

Kiertymäjäykkyyden maksimin suhteen ruuvirivien lisäämisen vaikutus ei ole niin selvä. Tulosten mukaan liitoksilla, joissa myös palkin vedetyn laipan yläpuolella on ruuvirivi, saadaan liitoksen maksimi kiertymäjäykkyys aikaiseksi kahdella ruuvirivillä, yksi vedetyn laipan molemmin puolin. Tämän jälkeen ruuvirivien lisääminen saattaa aiheuttaa kiertymäjäykkyyden pienenemisen. Tarkastelun mukaan kiertymäjäykkyyden pieneneminen johtuu luultavimmin liitoksen sisäisen momenttivarren pienenemisestä. Lisätyt ruuvirivit eivät tuo riittävästi lisää jäykkyyttä suhteessa pienentyneeseen momenttivarreen, joka aiheutuu ruuvien yhteisvaikutuksesta. Kyseistä ilmiötä tarkasteltiin vielä tarkemmin analyttisin laskelmin, joiden tulokset ovat esitettyinä kappaleessa 6.1.1.

Momenttikapasiteetin maksimoinnissa nähdään hyvin kapasiteetin määräytyminen heikoimman komponentin mukaan. Pienemmillä ruuveilla ja ruuvirivimäärillä tämä johtaa tilanteeseen, jossa liitoksen momenttikapasiteetti määräytyy ruuvin kapasiteetin mukaan. Kun ruuvien kapasiteetti on saavutettu ei päätylevyä kannata momenttikapasiteetin puolesta enää kannata kasvattaa, mutta kiertymäjäykkyyttä päätylevyn paksuntamisella pystytään vielä saamaan lisää. Suuremmilla ruuveilla ja ruuvirivimäärillä taas momenttikapasiteettia saadaan suuremmaksi, kunnes puristuspuolen kapasiteetti tulee vastaan. Momenttikapasiteetin kuvaajassa tämä näkyy selvästi momenttikapasiteetin tasaisena arvona suuremmilla ruuveilla ja ruuvirivimäärillä.

Kustannusnäkökulmasta liitoksen maksimi kiertymisjäykkyyttä ja momenttikapasiteettia haettaessa liitos kannattaa mitoittaa ylimenevän päätylevyn tapauksessa mahdollisimman pienillä ruuveilla käyttäen kahta ruuviriviä, jotka ovat palkin laipan molemmin puolin. Kahden ruuvirivin käyttämisellä ei ole kustannusten puolesta suurta eroa yhden ruuvirivin käyttämiseen, mutta liitokseen pystytään saamaan huomattavasti lisää jäykkyyttä sekä kapasiteettia otettaessa palkin laipan tukeva vaikutus täysin hyödyksi. Tämä näkyy varsinkin liitoksen momenttikapasiteetissa.



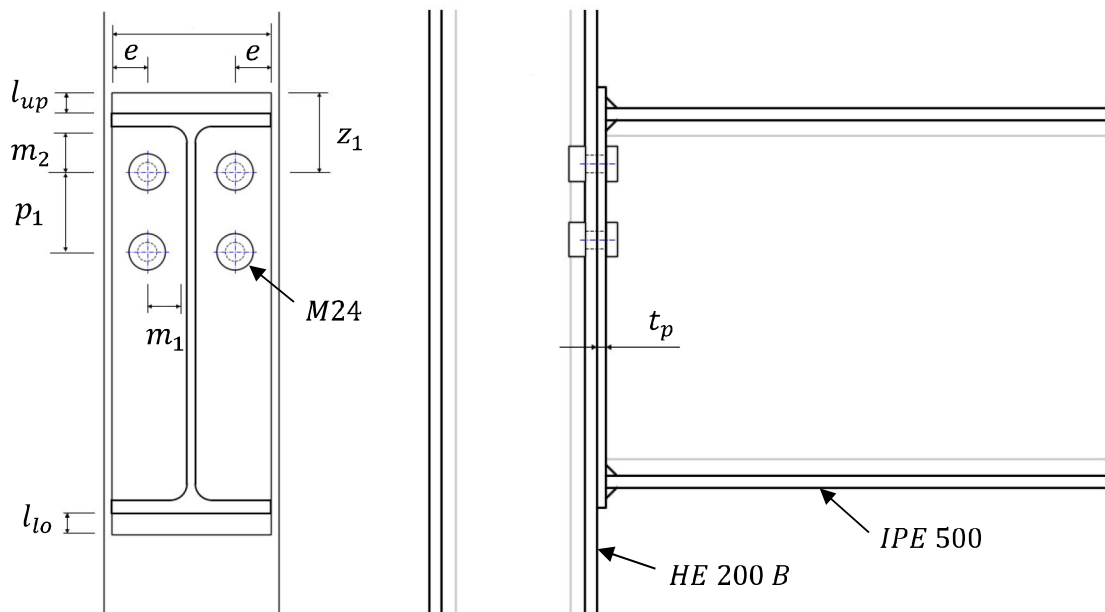
Kuva 53. Kiertymäjäykkyyden maksimiarvot eri ruuvikokojen ja ruuvirivien määrillä, kun myös palkin vedetyn laipan yläpuolella on ruuvirivi. Alhaalla esitettyä maksimi kiertymäjäykkyyden omaava liitos. Kyseisen liitoksen tiedot esitettyinä pylväskuvaajissa sinisellä nuolella. Maksimi kiertymäjäykkyys saavutetaan paksulla päätylevyllä ja ruuvirivien ollessa kaukana puristuskeskiöstä. Ylimenevällä päätylevyn osalla oleva ruuvirivillä saadaan kiertymäjäykkyyttä huomattavasti lisää viemällä ruuvirivi ylöspäin, jos päätylevyn paksuus on riittävä.

Tulosten mukaan jäykistämättömillä liitoksilla ei välttämättä pystytä saavuttamaan jäykkiä liitoksia edes sivusiirtymättömissä kehissä. Tehdyssä tarkastelussa vain palkilla IPE

300 liitokset saatiin jäykiksi ja muilla palkkien profiileilla liitosjäykkyydet jäivät jo sivusiirtymättömän kehän jäykän liitoksen rajan $S_{j,jäykkä} = 8 \frac{EI_b}{L_b}$ alle. Jäykän liitoksen rajaan vaikuttaa huomattavasti palkin tiedot, mutta tulosten mukaan jäykistämättömillä liitoksilla ei välttämättä pystytä tekemään jäykkiä liitoksia sivusiirtymättömissäkään kehissä ja sivusiirtyvissä kehissä jäykkien liitosten mitoittaminen saattaa olla mahdotonta ilman jäykisteitä. Jäykisteillä liitoksen joustavimpien peruskomponenttien, kuten pilarin laipan sekä päätylevyn taivutuksen ja puristuspuolen jäykkyyttä pystyttäisiin huomattavasti kasvattamaan ja siten myös kasvattamaan liitoksen kiertymisjäykkyyttä. Tämä kuitenkin lisäisi liitoksen kustannuksia merkittävästi ja ei siksi ole välttämättä hyvä ratkaisu.

6.1.1 Ruuvirivien lisäämisen vaikutus

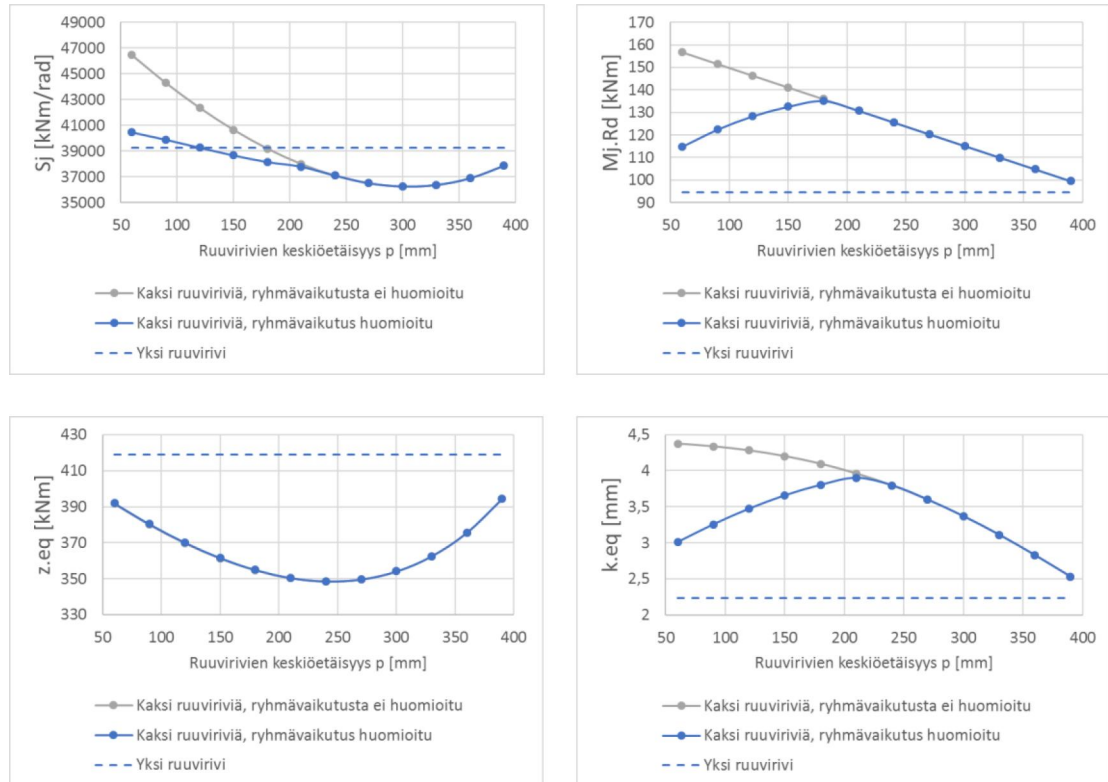
Kiertymäjäykkyyden maksimiarvon tarkastelussa huomattiin erikoisuus ruuvirivien lisäämisen vaikutuksesta, jossa rivien lisääminen ei välttämättä lisännyt liitoksen kiertymisjäykkyyttä. Tämän takia ruuvien ruuvirivien lisäämisen vaikutusta päätettiin tarkastella vielä yksinkertaisella liitoksella analyttisin laskelmin.



Kuva 54. Tarkistuslaskelmissa käytetty liitos. Muuttujana käytettiin ruuvirivien keskiöetäisyyttä p . Pilarin, palkin sekä päätylevyn materiaaleina käytettiin terästä S275 ja ruuveina käytettiin M24 lujuusluokalla 8.8. Mitat $t_p = 12 \text{ mm}$, $z_1 = 100 \text{ mm}$, $e = 45 \text{ mm}$ ja $l_{up} = l_{lo} = 27 \text{ mm}$

Pilariksi tarkasteluun valittiin HE 220 B ja palkiksi valittiin IPE 500. Pilarin, palkin sekä päätylevyn materiaaleina käytettiin terästä S275. Ruuveiksi liitokseen valittiin M24 ruuvit lujuusluokalla 8.8. Liitos tarkasteltiin sekä yhdellä että kahdella ruuvirivillä ja kaksirivisessä liitoksessa muuttujana pidettiin ruuvirivien välistä keskiöetäisyyttä. Molem-

missä tapauksissa pilari, palkki, päätylevyn koko ja paksuus sekä ruuvirivien reunaetäisyydet ja ensimmäisen ruuvirivin paikka pidettiin samoina ja vain ruuvirivien keskiöetäisyyttä p muutettiin. Kuvassa alla (Kuva 54) on esitettyä liitosgeometria kaksirivisenä. Päätylevyn paksuutena käytettiin $t_p = 12 \text{ mm}$, ensimmäisen ruuvirivin etäisyytenä käytettiin $z_1 = 100 \text{ mm}$ ja ruuvien reunaetäisyyksinä käytettiin $e = 45 \text{ mm}$. Päätylevyn leveys määritettiin palkin leveyden mukaan ja päätylevyn ylimenevien osien pituuksina käytettiin $l_{up} = l_{lo} = 27 \text{ mm}$. Kaikki muut mitat johdettiin esitetyistä mitoista ja pilarin sekä palkin tiedoista.



Kuva 55. Ruuvirivien välisen etäisyyden vaikutus liitoksen kiertymäjäykkyyteen ja momenttikapasiteettiin. Ylhäällä liitoksen kiertymäjäykkyys (vas.) ja momenttikapasiteetti (oik.) ja alhaalla liitoksen ekvivalentti sisäinen momenttivarssi (vas.) ja vetopuolen ekvivalentti jäykkyys (oik.). Kuvaajissa käytetty tasoitettuja viivoja esittämään tulokset selkeämmin, viivat eivät ole sovitteita.

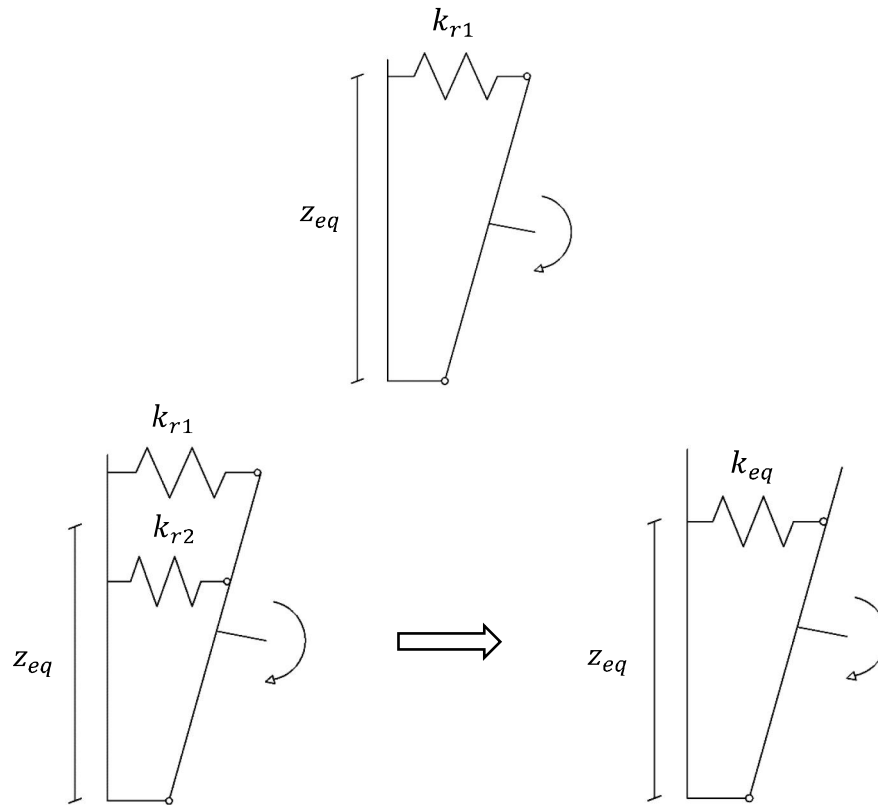
Tarkastelun tulokset ovat esitettyinä kuvassa (Kuva 55) ja laskelmissa käytetyt laskentapohjat ovat esitettyinä liitteissä C ja D. Tulokset laskettiin analyttisesti käsin työssä tehdyn liitosmitoitushjelman tulosten tarkastamiseksi. Saadut tulokset olivat samoja käsin tehdyillä laskentapohjilla sekä liitosmitoitushjelmalla, ottamatta huomioon liitosmitoitushjelman tarkempaa α arvoa palkin vedetyn laipan alla olevan ensimmäisen ruuvirivin tarkastelussa. Eroavaisuudet olivat kuitenkin erittäin pieniä ja käsin laskennan tulokset olivat täysin samoja liitosmitoitushjelman kanssa käytettäessä liitosmitoitushjelman mukaista tarkkaa α :n arvoa. Liitosmitoitushjelmassa käytetty α :n määritys on esitettyinä kappaleessa 3.6.6.

Tuloksista voidaan nähdä, että ruuviryhmällä on suuri vaikutus sekä kiertymisjäykkyyteen että momenttikapasiteettiin pienemmillä ruuvirivien keskiöetäisyyksillä. Kaksirivisessä liitoksessa ruuvirivien muodostaman ruuviryhmän efektiivinen leveys on huomattavasti yksittäisten ruuvirivien yhteen laskettua efektiivistä leveyttä pienempi ja tämä näkyy suoraan sekä peruskomponenttien jäykkyydessä sekä kapasiteeteissa.

Momenttikapasiteetissa ruuviryhmän vaikutus on erityisen selvä. Pienillä ruuvirivien välisillä keskiöetäisyyksillä ruuviryhmän kapasiteetti on määräävä ruuviryhmän muodostaman T-osan pienen efektiivisen leveyden myötä. Ilman ruuviryhmän vaikutusta momenttikapasiteetin määrää pilarin uuman leikkauskapasiteetti, eli puristuspuolen kapasiteetti, joka näkyy momenttikapasiteetin kuvaajassa lineaarisena. Kuvaaja on lineaarinen, sillä toisen ruuvirivin siirtäminen lähemmäs puristuskeskiötä vaikuttaa lineaarisesti momenttikapasiteettiin, kun ruuvirivien kapasiteetit pysyvät vakioina. Esimerkin tapauksessa ruuviryhmän vaikutus huomioituna ruuvirivien välisellä keskiöetäisyydellä $p_1 = 60 \text{ mm}$ liitoksen momenttikapasiteetti on 26.7 % pienempi verrattuna tilanteessa, jossa ruuviryhmän vaikutusta ei ole huomioitu. Esimerkki esittää selvästi kuinka tärkeää myös ruuviryhmien vaikutuksen huomioiminen on liitoksen mitoituksessa.

Ruuviryhmän vaikutus kiertymäjäykkyyteen näkyy myös selvästi tuloksista. Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaan liitoksen kiertymäjäykkyyden laskennassa ruuvirivien peruskomponenttien jäykkyys määritetään ruuvirivin pienimmän efektiivisen leveyden mukaan, joko yksittäisenä ruuvirivinä tai ruuviryhmän osana tarkasteltuna. Näin ollen ruuviryhmä saattaa pienentää ruuvirivien efektiivistä leveyttä huomattavasti ja siten myös laskea ruuvirivien jäykkyyksiä. Huomattavaa on myös, että ilman ruuviryhmän vaikutustakin kahdella ruuvirivillä liitoksen kiertymäjäykkyys laskee pienemmäksi kuin yhtä ruuviriviä käyttäessä, kun ruuvirivien keskiöetäisyys kasvaa.

Yhden ruuvirivin tapauksessa vetopuolen painopiste on selvä, mutta suuremmalla ruuvirivimäärällä myös sisemmät ruuvirit vaikuttavat painopisteeseen. Useammalla ruuvirivillä myös sisemmät ruuvirit ottavat kuormitusta vastaan ja siirtävät siten efektiivistä vetokeskiötä lähemmäs puristuskeskiötä (Kuva 56). Ruuvirivien lisääminen kasvattaa vetopuolen jäykkyyttä, mutta myös samalla pienentää liitoksen sisäistä momenttivartta. Sisäisen momenttivarren pienentyminen taas kasvattaa puristuspuolen jäykkyyttä (kaava (27)). Ruuvirivien lisääminen kasvattaa siis kokonaisuudessaan kiertymäjäykkyyteen vaikuttavien komponenttien jäykkyyttä ja siten myös liitoksen komponenttien yhteen laskettua ekvivalenttia jäykkyyttä (kaavan (15) käänteisluku). Kuitenkin veto- ja puristuspuoli toimivat sarjassa liitoksen kiertyessä, jolloin sarjaan kytkettyjen jousien yhteenlaskuperiaatteiden mukaisesti kokonaisjäykkyys on pienempi kuin yhdenkään sarjassa olevan jousen jäykkyys. Näin ollen jäykkyyden lisäys on suhteessa komponenttien jäykkyyden kasvua pienempi ja vaikutus saattaa siten olla suhteessa pienempi sisäisen momenttivarren vaikuttaessa toiseen potenssiin liitoksen kiertymäjäykkyyden määrittämisessä (Liite A, kiertymäjäykkyyden johtaminen jousimallista).



Kuva 56. Periaatekuva ruuvirivien lisäämisen vaikutuksesta liitoksen sisäiseen momenttivarteeseen, liitoksen vetopuolen jouset. Yhdellä ruuvirivillä sisäinen momenttivarsi muodostuu suoraan puristuspuolen ja vedetyn rivin keskiöetäisyyksistä. Suuremmalla ruuvirivimäärällä vetopuolen ekvivalentin jousen jäykkyys sekä sisäinen momenttivarsi saadaan rinnan olevien jousien mukaan, ottamalla huomioon vetopuolen jousien jäykkyydet ja etäisyydet puristuskeskiöstä. Vetopuolen ekvivalentti jäykkyys kasvaa, mutta sisäpuolelle rivejä lisättäessä sisäinen momenttivarsi on pienempi, kuin yhtä riviä käytettäessä.

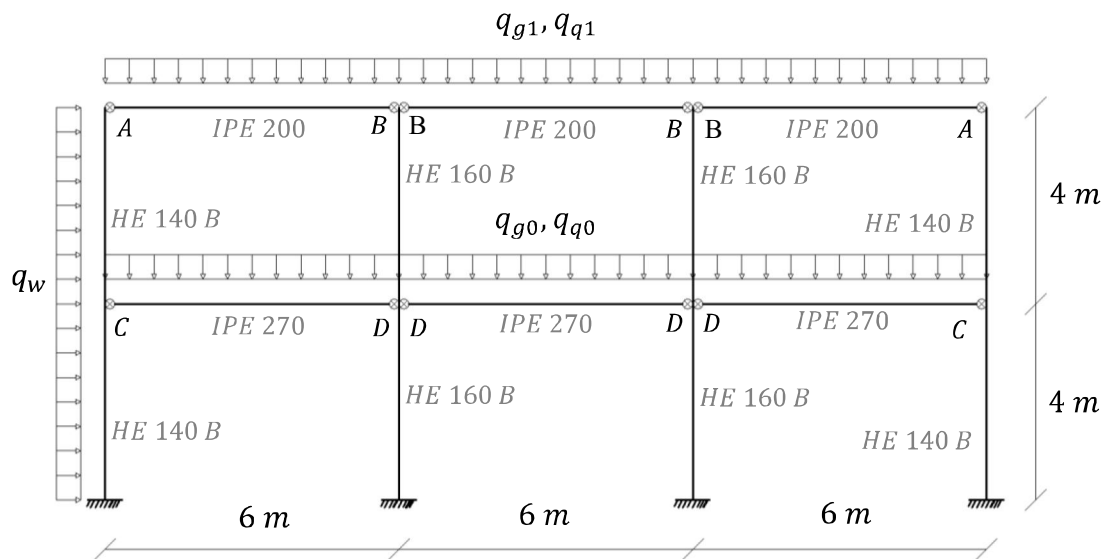
Tarkastelusta voidaan vetää johtopäätökset, että ruuvirivejä lisäämällä liitoksen momenttikapasiteettia saadaan kasvatettua, mutta kiertymisjäykkyyttä ei välttämättä saada lisää. Tulosten mukaan on myös selvää, että ruuviryhmien vaikutus on suuri liitoksen toimintaan ja kaikki ruuviryhmätapaukset tulee ottaa mitoituksessa huomioon määräävimmän tapauksen löytämiseksi.

6.2 Vertailututkimus aiempiin tutkimuksiin

Vertailututkimuksen pohjana käytettiin Diazin et al. tutkimusta osittain jäykkien päätyliitosten kustannusoptimoinnista [8]. Kyseisessä tutkimuksessa tarkastellaan yksinkertaisen tasokehän reunan pilari-palkki liitoksia, joiden optimaaliset kiertymäjäykkyydet ovat määritetty ennen liitosoptimointia. Diaz et al. tutkimuksessa käytetyt esimerkkikehärakenteet ovat samat, joita Cabrerón ja Bayon ovat käyttäneet tekemässään tutkimuksessa [3]. Diaz et al. käyttivät tutkimuksessaan liitosmitoitukseen FEM- pohjaista meta-

mallia, jonka avulla laskennallisesti raskaasta FEM-mallista saatiin muodostettua liitoksen toiminnan kuvaava yksinkertaistettu malli. Diaz et al. käyttämät kustannusfunktiot ovat esitettyinä lähteessä [8].

Cabrero ja Bayo keskittyivät työssään menetelmän kehittämiseen, jolla liitosmitoitus voidaan tehokkaasti liittää koko kehän mitoituskeinoon. Alustavaan liitosmitoitukseen Cabrero ja Bayo käyttivät yksinkertaistettua komponenttimenetelmää ja lopullisen mitoituskeinoon standardin SFS EN 1993-1-8 [1] mukaista komponenttimenetelmää. Cabrero ja Bayo eivät kuitenkaan tarkemmin esitä käyttämiään kustannusfunktioita ja vain koko rakenteen kustannukset ovat esitettyinä. Näin ollen tarkempien tietojen puuttuessa kustannusoptimoinnin pohjalta, kyseistä Cabreron ja Bayon tutkimusta ei pystytä suoraan käyttämään vertailututkimuksessa.



Kuva 57. Kehän liitoksista tarkasteltiin sivupilareiden liitoksia A ja C. Kuormista aiheutuvat liitosten vaaditut kapasiteetit otettiin suoraan Diaz et al. tutkimuksesta ja ne ovat esitettyinä taulukossa alla (Taulukko 8). Kuormista q_w on tuuli kuorma, q_g palkin omapaino ja q_q on määräävä muuttuva tasokuorma.

Tarkasteltava kehä on esitettyä kuvassa yllä (Kuva 57). Kehä on yksinkertainen sivusiirtyvä tasokehä, jonka kaikki liitokset ovat päätylevyliitoksia ja pilarit sekä palkit ovat I- tai H-poikkileikkauksia. Vertailututkimukseen otettiin tarkasteluun kuvassa (Kuva 57) esitetyt liitokset A ja C, joille Cabreron ja Bayon sekä Diaz et al. tutkimuksissa on esitetty sekä kohdekiertymäjäykkyudet sekä tarvittavat momenttikapasiteetit. Kyseiset kohdearvot ovat esitettyinä taulukossa alla (Taulukko 8). Tämän lisäksi tässä työssä otettiin huomioon liitokseen vaikuttava leikkausvoima, sillä liitoksen murtomuoto on hauras ruuvien leikkauskapasiteetin määrittäessä kapasiteetin ja tämä tulisi aina yrittää välttää. Diaz et al. tutkimuksessa käytetyt palkkien kuormitukset (Kuva 57) ovat myös esitettyinä taulukossa alla (Taulukko 8). Kuormien yhdistelmäkertoimina käytettiin standardin EN 1990 [17]

mukaisia omapainon ja määräävän muuttuvan kuormituksen yhdistelmäkertoimia murto-rajatilassa. Liitokseen vaikuttava leikkausvoima laskettiin määräävimman kuormitusyhdistelmän mukaan alla olevan kaavan mukaisesti

$$V_{Ed} = 0.5L_b \max(1.35q_g, 1.15q_g + 1.5q_q) \quad (97)$$

jossa L_b on palkin pituus, q_g on palkin omapainon kuorma ja q_q on määräävä muuttuva tasokuorma, kuten kuvassa yllä (Kuva 57) on esitetty. Tarkasteltavien liitosten A ja C leikkausvoimakuormat ovat myös esitettyinä taulukossa alla (Taulukko 8).

Taulukko 8. *Diaz et al. vertailututkimuksessa tarkasteltujen liitosten vaaditut kapasiteetit ja kiertymäjäykkyydet*

Liitos	Pilari	Palkki	$M_{j,Ed}$ [kNm]	$V_{j,Ed}$ [kN]	$S_{j,target}$ [kNm/rad]
A	HE 140 B	IPE 200	22	26.325	9000
C	HE 140 B	IPE 270	40	32	16000

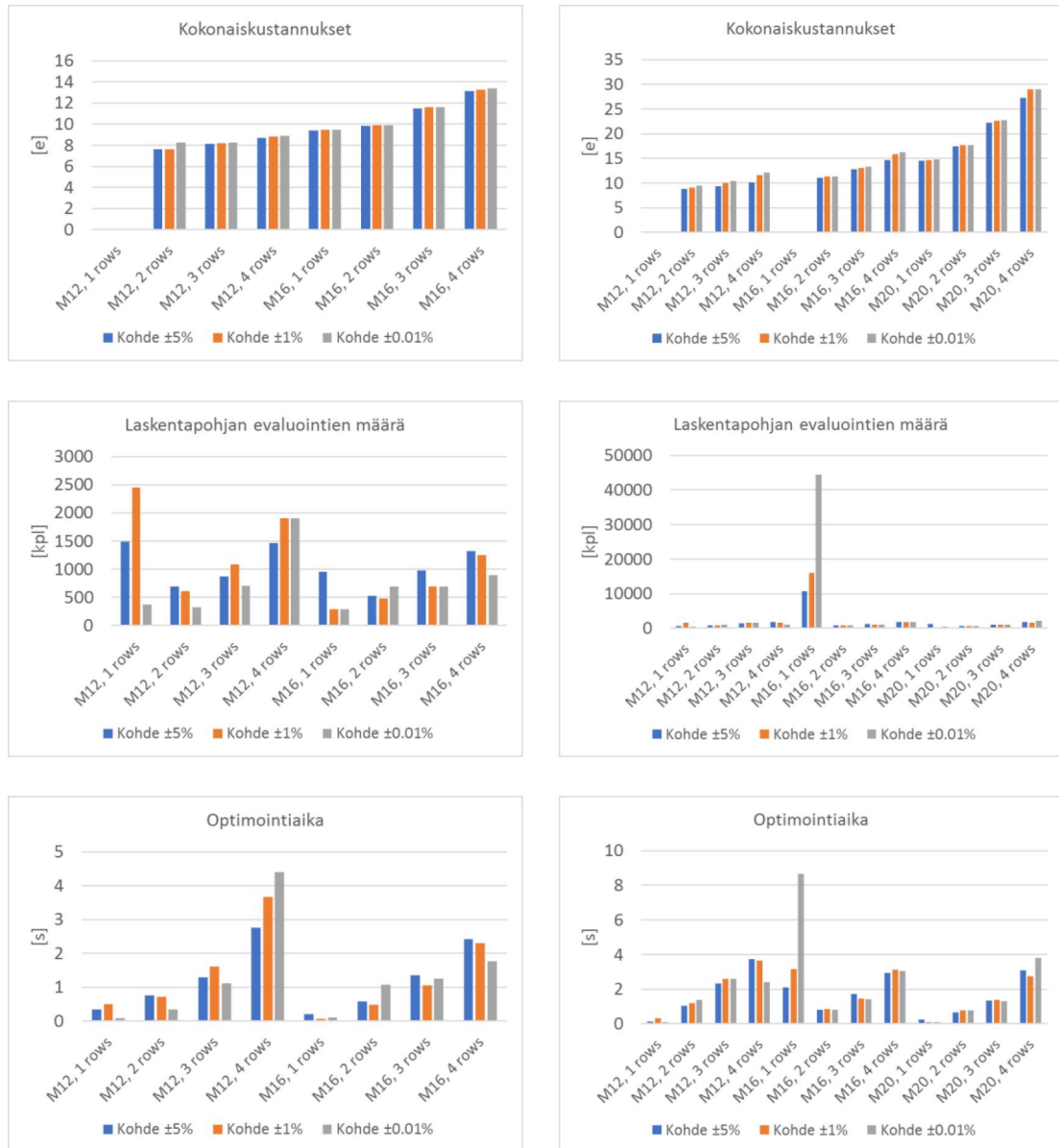
Liitoskonfiguraationa käytettiin pidennettyä päätylevyliitosta, jossa ylin vedetty ruuvirivi on palkin vedetyn laipan ulkopuolella. Kustannusoptimoinnissa muuttujiksi valittiin päätylevyn paksuus t_p , ruuvirivien reunaetäisyys e , päätylevyn ylimenevän osan pituus h_{up} ja ruuvirivien etäisyydet päätylevyn yläosasta. Lisäksi optimoinnissa käytettiin päätylevyn ylimenevän osan pituutena $4d$, kuten kappaleessa 5 on esitetty. Jokainen yhdistelmä ruuvirivien määrällä 1-4 ja ruuvien standardikoolalla väliltä M12-M36 optimoitiin erikseen. Optimointitehtävä muodostettiin kappaleessa 5 esitetyllä tavalla.

Taulukko 9. *Suoritetun kustannusoptimoinnin ja Diaz et al. tutkimuksen tulokset. Tämän tutkimuksen tulokset esitettyinä taulukossa kiertymäjäykkyyden rajoitusehdoilla $S_{j,target} \pm 5\%$ ja $S_{j,target} \pm 0.01\%$ (kaavat (87)-(90)).*

	Liitos A			Liitos C		
	Tämä tutkimus		Diaz et al. [8]	Tämä tutkimus		Diaz et al. [8]
	$\pm 5\%$	$\pm 0.01\%$		$\pm 5\%$	$\pm 0.01\%$	
d [mm]	12	12	16	12	12	16
n_r [kpl.]	2	2	3	2	2	3
t_p [mm]	6.91	11.62	12	7.88	11.50	11
e [mm]	28.8	28.8	22	39.3	39.3	32
e_x [mm]	37.61	22.52	22	36.48	35.03	31
p_x [mm]	59.59	79.32	61	57.24	58.69	61
$kustannus$ [€]	7.61	8.22	12.39	8.77	9.43	13.50
S_j [kNm/rad]	8860.10	8999.10	9437.90	15359.72	15998.40	16040.90
$M_{j,Rd}$ [kNm]	22.00	29.21	41.28	40.00	47.43	54.29

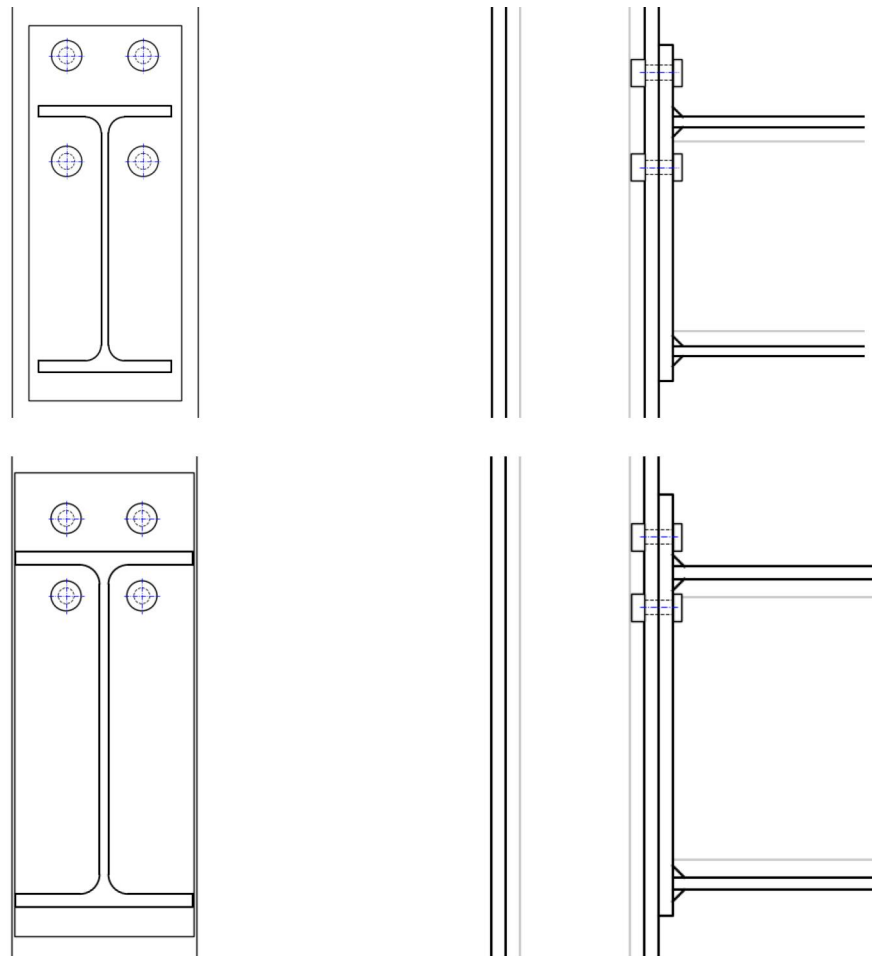
Kustannusoptimoinnin tulokset ovat esitettyinä taulukossa yllä (Taulukko 9) kuvissa alla (Kuva 58 ja Kuva 59). Molemmissa liitoksissa, A sekä C, kustannusoptimiin päästiin käyttämällä kahta ruuviriviä ruuvikoon ollessa M12. Molemmissa liitoksissa yhdellä ruuvirivillä ruuvien yhdistetty leikkaus- ja vetokapasiteetti ei riittänyt varmistamaan, että

ruuvien leikkauskapasiteetti ei tule liitoksessa määrääväksi. Kuvasta (Kuva 58) voidaan selvästi nähdä, että minimikustannuksiin päästään yleisesti mahdollisimman vähällä määrällä ruuvirivejä, sillä ruuvirivien lisääminen tuo varsinkin suuremmilla ruuviko'illa huomattavasti lisää kustannuksia. Lisäksi optimoinnin näkökulmasta suuri ruuvirivien määrä kasvattaa optimointiaikaa, sillä mahdollisten ruuviryhmien määrä kasvaa nopeasti ruuvirivien määrän kasvaessa.



Kuva 58. Liitoksen A (vas) ja C (oik) kustannusoptimoinnin tulokset eri kiertymäjäykkyyden kohdearvon rajoituksilla, kiertymäjäykkyyden kohdearvo liitoksella A 9000 kNm/rad ja liitoksella C 16000 kNm/rad. Kustannusoptimi saavutetaan molemmissa liitoksissa käyttämällä kahta M12 ruuviriviä, joista ylempi on vedetyn laipan ulkopuolella. Yhdellä M12 ruuvirivillä ruuvien leikkauskapasiteetti tulee rajoittavaksi tekijäksi.

Huomion arvoista on kuitenkin, että saadut optimaaliset liitokset (Kuva 59) on optimoitu vain palkin vahvemman akselin suhteen ja vain yhden suunnan momentille. Kyseiset liitokset ovat käytännössä nivellisiä tilanteissa, joissa momentti vaikuttaa vastakkaiseen suuntaan ja palkin alalaippa menee vedolle. Näin voi käydä esimerkiksi sivusiirtyvissä kehissä, joissa liitosten kiertymisjäykkyyttä käytetään kehän jäykistämiseen. Tilanteissa, joissa liitoksen jäykkyys molempiin suuntiin on kriittinen, tulisi liitos mitoittaa molempiin suuntiin erikseen sekä kapasiteetin, että kiertymäjäykkyyden suhteen todellisen käyttäytymisen kuvaamiseksi tai käyttää symmetristä liitosta. Tässä tarkastelussa on kuitenkin oletettu, että kuormitus vaikuttaa aina samaan suuntaan ja vastakkaisen suunnan kapasiteettia ja kiertymisjäykkyyttä ei tarvitse ottaa huomioon.



Kuva 59. Tässä työssä tehdyn kustannusoptimoinnin mukaiset optimiliitokset. Ylhäällä liitoksen A optimitulos ja alhaalla liitoksen C optimitulos kiertymäjäykkyyden tarkimmalla kohdearvolla (kohde 0.01%)

Tulosten mukaan optimointiaika on Diaz et al. tutkimukseen verrattuna erinomainen ja esittää hyvin komponenttimenetelmän käyttökelpoisuuden mitoituksessa sekä optimoinnissa. Diaz et al. tutkimuksessa molempien liitosten optimoimiseen tarvittiin vielä näiden lisäksi noin 180 s. Komponenttimenetelmällä molempien liitosten, A ja C, kustannusoptimointiin kului yhteensä aikaa kiertymäjäykkyyden $\pm 5\%$ rajoituksella noin 29.1 s ja kiertymäjäykkyyden $\pm 0.01\%$ rajoituksella noin 36.9 s. Tuloksista nähdään, että molemmilla

menetelmillä, sekä metamallilla että komponenttimenetelmällä, optimointi pystytään suorittamaan tehokkaasti järkevässä ajassa ja hyviin tuloksiin päästään sekä heuristisilla että gradienttipohjaisilla optimointialgoritmeilla.

Komponenttimenetelmän laskentapohjan koodaamiseen on arviolta mennyt aikaa noin 400 h, mutta menetelmä on myös huomattavasti monipuolisempi ja laajennettavissa. Metamalli soveltuu käytettäväksi vain metamallin pohjalla olleelle liitostyypille, joka tässä tapauksessa vastaa pilari-palkki päätylevyliitosta kolmella ruuvirivillä. Kustannusoptimointiin mennyttä aika on kuitenkin hankalempi vertailla, sillä käytetyt optimointialgoritmit eivät ole samat.

Metamallin käyttö saattaa olla järkevää laskennallisesti raskaiden tehtävien yhteydessä tai monimutkaisten ja vaativien tehtävien yksinkertaistamisessa optimoimista varten. Metamallin huonona puolena on kuitenkin metamallin muodostamisen vaatima laskenta-aika ja metamallin tulosten riippuvuus mallin muodostuksen onnistumisesta. Lisäksi tehtyä metamallia on erittäin hankala muuttaa vastaamaan toista mallia ilman täysin uuden metamallin tekemistä. Näin ollen metamallin käyttö ei välttämättä ole järkevää tapauksissa, joissa tehtävä pystytään kuvaamaan riittävällä tarkkuudella myös tehokkaammalla menetelmällä, kuten komponenttimenetelmällä päätylevyliitosten tapauksessa.

6.3 Kiertymäjäykkyyden ja momenttikapasiteetin vaikutus kustannuksiin

Liitoksen kiertymäjäykkyyden sekä momenttikapasiteetin vaikutusta kustannuksiin tarkasteltiin sekä ylimenevällä päätylevyliitoksella, että tasakorkealla päätylevyliitoksella. Kohdeliitokseksi valittiin edellä esitetty Diaz et al. tutkimuksen mukainen liitos C. Muutujina optimoinnissa käytettiin ruuvien kokoja, ruuvirivien määrää, päätylevyn paksuutta, ruuvien reunaetäisyyksiä ja ruuvien etäisyyksiä päätylevyn yläosasta. Kustannusoptimi määritettiin yhdistelmistä ruuvirivien määrällä 1-4 ja standardi ruuviko'illa M12-M36.

6.3.1 Kiertymäjäykkyyden vaikutus

Liitoksen kiertymäjäykkyyden vaikutusta tarkasteltaessa kiertymäjäykkyys rajoitettiin $\pm 5\%$ kohdearvosta kaavojen (87)-(90) mukaan ja kohdearvo määritettiin palkin jäykkyyden mukaan. Palkin jäykkyyden mukainen liitoksen kiertymäjäykkyyden kohdearvo määritettiin kaavalla

$$S_{j.target} = x_{target} \left(\frac{E_b I_b}{L_b} \right) \quad (98)$$

jossa E_b on palkin kimmokerroin, I_b palkin neliöjäyhyys vahvempaan suuntaan ja L_b on palkin tukivälin pituus. Kerroin x_{target} on haluttu suhteellinen kiertymäjäykkyys, jonka arvo 0.5 vastaa nivelellisen liitoksen rajaa, 8 vastaa sivusiirtymättömällä kehällä jäykkien

liitosten rajaa ja 25 vastaa sivusiirtyvällä kehällä jäykkien liitoksien rajaa. Kaavasta voidaan nähdä, että palkin tukivälin pituus vaikuttaa huomattavasti referenssijäykkyyteen ja siten myös nivellellisen sekä täysin jäykän liitoksen raja-arvoihin. Kuitenkin saadut tulokset kustannusoptimeista antavat arvion liitoksen kustannusten jakautumisesta eri kustannustekijöihin.

Optimointitehtävä muodostettiin kappaleessa 5 esitetyllä tavalla, käyttämättä kuitenkaan liitoksen momenttikapasiteetin rajoitusehtoa. Optimointitehtävä yleisessä muodossa esitettyä alla

$$\min \quad C_T(\underline{x}) \quad (99)$$

$$\begin{aligned} s. t \quad & S_{j,min} \leq S_j(\underline{x}) \leq S_{j,max} \\ & e, m \geq \max(1.2d_0, 0.5d_w) \\ & p_{i,i+1} \geq \max(2.2d_0, d_w) \\ & w \geq 2.4d_0 \\ & \eta_{leikkaus}(\underline{x}) \leq 1.0 \end{aligned}$$

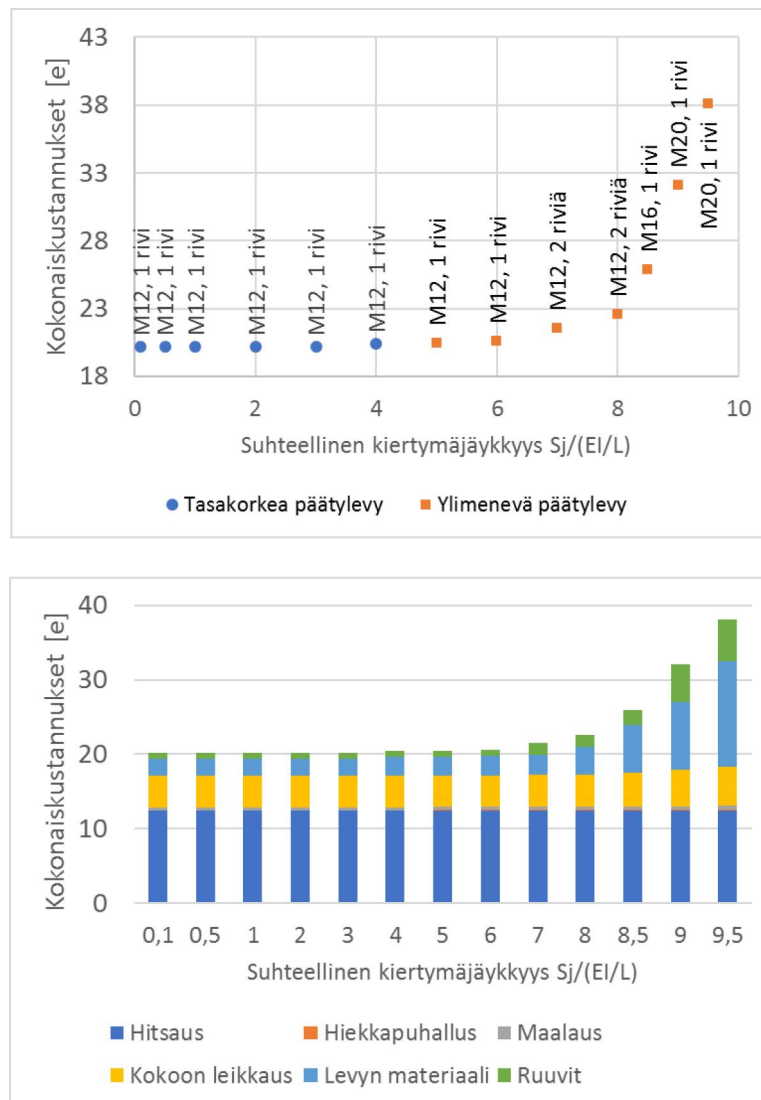
$$\begin{aligned} x &= \{t_p, e, z_r, d, n_r\} \\ d &\in [12, 16, 20, 24, 27, 30, 36] \\ n_r &\in [1, 2, 3, 4] \end{aligned}$$

jossa olevat muuttujat ja parametrit ovat esitettyinä tarkemmin kappaleessa 5. Lisäksi optimoinnissa on huomioitu liitoskonfiguraatio ylimenevällä päätylevyllä sekä palkin kanssa tasakorkealla päätylevyllä.

Liitosjäykkyyden vaikutukset liitoksen kustannuksiin ovat esitettyinä kuvassa alla (Kuva 60). Kuvasta voidaan selvästi nähdä, että liitoksen kustannukset kasvavat nivellelliseen liitokseen verrattuna lähes kaksinkertaiseksi liitosjäykkyyden kasvaessa suureksi. Suuremmat kiertymisjäykkyydet saavutetaan suuremmilla ruuveilla, jotka kasvattavat nopeasti myös kustannuksia. Kuvaajan alun tasainen osuus aiheutuu siitä, että kiertymäjäykkyyttä saadaan kasvatettua vain palkin laippojen sisällä olevan ruuvirivin paikkaa muuttamalla. Tämä ei lisää liitoksen kokonaiskustannuksia, sillä päätylevyn paksuus voidaan pitää minimissään ja ruuvikoko pysyy samana. Ruuvien reikien paikka ei vaikuta kustannuksiin, jos mikään muu liitoksen kustannuksiin vaikuttavista tiedoista ei muutu.

Tulosten mukaan on myös selvää, että jäykistämättömillä liitoksilla on hankala päästä täysin jäykkiin liitoksiin sivusiirtyvillä kehillä. Liitoksen jäykkyysrajat määritetään palkin jäykkyyteen perustuen, kuten kappaleessa 3.3 on esitetty, joten palkin pituus/kantoväli vaikuttaa huomattavasti jäykkyysrajoihin. Kuitenkin sivusiirtyvillä kehillä täysin jäykän liitoksen raja on niin suuri, että ilman jäykistyksiä täysin jäykän liitoksen kiertymäjäykkyyteen on hankala päästä.

Kuvassa (Kuva 60) esitetystä pylväskaaviosta voidaan selvästi nähdä, että liitoksen kustannukset muodostuvat suurimmaksi osakseen hitsaus-, leikkaus- ja materiaalikustannuksista. Hitsauskustannukset aiheuttavat suuren osan liitoksen kustannuksista ja on siten kustannuskomponentti, johon tulisi kiinnittää huomiota kustannusten minimoimiseksi. Tässä työssä kaikissa tarkasteluissa liitoksen hitsit mitoitetiin tasalujiksi palkin kanssa kappaleessa 3.6.9 esitetyllä tavalla ja saatujen tulosten mukaan hitsauskustannuksista aiheutuu noin 32-62 % liitoskustannuksista kiertymäjäykkyydestä riippuen.



Kuva 60. Liitosjäykkyyden vaikutus kustannusoptimiin.

Hitsien kokoa pystyttäisiin kuitenkin luultavimmin saamaan monessa tapauksessa pienemmiksi mitoittamalla hitsit liitoksen kuormien mukaan, jolloin myös kustannuksia saataisiin huomattavasti pienemmiksi. Hitsien mitoituksessa tulee kuitenkin olla tarkkana, sillä liitoksen kapasiteetti ei tulisi määräytyä hitsien kapasiteetin mukaan, sillä tällöin liitos on hauras. Tämän myötä liitosmitoitus menee helposti iteratiiviseksi prosessiksi hitsien koon vaikuttaessa liitoksen muihin komponentteihin. Tämä voidaan välttää käyttämällä hitsien mitoituksessa esimerkiksi lisäkerrointa, jotta mitoitus on konservatiivinen.

Toinen mahdollisesti hyvä tapa on mitoittaa hitsit liitoksen maksimi momenttikapasiteetin mukaan, joka saadaan määritettyä suhteellisen helposti puristuspuolen kapasiteetin ja ruuvien vetokapasiteettien mukaan.

Levyn leikkauskustannukset pysyvät lähes vakioina päätylevyn koosta riippumatta, sillä leikkauspituus kasvaa vain suhteellisen vähän päätylevyn korkeuden kasvaessa. Tulosten mukaan leikkauskustannuksista aiheutuu noin 14-21 % liitoksen kustannuksista kiertymäjäykkyydestä riippuen. Helpoiten leikkauskustannuksiin voidaan vaikuttaa käyttämällä mahdollisimman ohutta päätylevyä, jolloin leikkausaika pysyy minimissään. Tämän vaikutus on kuitenkin muihin kustannustekijöihin nähden suhteellisen pieni ja leikkauskustannuksien minimoinnilla ei pystytä saavuttamaan kovinkaan merkittäviä kustannussäästöjä. Samoin levyn hiekkapuhallus ja maalaus-kustannukset ovat suhteessa muihin kustannustekijöihin niin pieniä, että niiden vaikutus voidaan jättää käytännössä kustannusoptimoinnissa huomioimatta. Tulosten mukaan alle 3 % liitoksen kokonaiskustannuksista aiheutuu hiekkapuhalluksesta ja maalaus-kustannuksista.

Pylväskaavion (Kuva 60) mukaan myös materiaalikustannuksilla on merkittävä vaikutus liitoksen kustannuksiin, materiaalikustannusten aiheuttaessa jopa yli puolet liitoksen kokonaiskustannuksista suurilla kiertymäjäykkyyden arvoilla. Tulosten mukaan materiaalikustannukset aiheuttavat noin 15-52 % liitoskustannuksista kiertymäjäykkyydestä riippuen. Päätylevyn tilavuuden kasvaessa myös liitoksen kustannukset kasvavat huomattavasti. Lisäksi suuremmat ruuvit ovat selvästi kalliimpia, joten kustannusten minimoimiseksi liitos kannattaa toteuttaa mahdollisimman pienillä ruuveilla. Ruuvien valinnassa tulee kuitenkin ottaa huomioon ruuvein leikkauskapasiteetti, joka tulee helposti vastaan käytettäessä pieniä ruuveja. Leikkauspalkan käytöllä voidaan leikkauskapasiteettia saada tehokkaasti lisää, mutta leikkauspalkan tuomat lisäkustannukset saattavat olla niin suuret, että kustannusnäkökulmasta tämä ei välttämättä ole järkevää.

6.3.2 Momenttikapasiteetin vaikutus

Momenttikapasiteetin vaikutuksen tarkastelussa momenttikapasiteetin kohdearvo suhteutettiin liitoksen lujuusluokituksen mukaan pilarin ja palkin plastiseen kapasiteettiin. Momenttikapasiteetin vaikutuksen tarkastelussa liitoksen kiertymäjäykkyys annettiin olla rajoittamaton ja momenttikapasiteetille annettiin vain alaraja. Rajoitusehtona kustannusoptimoinnissa käytettiin kaavaa (85) ja momenttikapasiteetin kohdearvo määritettiin alla olevan kaavan mukaisesti

$$M_{j,target} = x_{target} \left(\min \left(\frac{W_{pl.Rd.b} f_y}{\gamma_{M0}}, 2 \frac{W_{pl.Rd.c} f_y}{\gamma_{M0}} \right) \right) \quad (100)$$

jossa $W_{pl.Rd.b}$ ja $W_{pl.Rd.c}$ ovat palkin ja pilarin plastiset taivutusvastukset, f_y on palkin ja pilarin materiaalin myötöraja ja γ_{M0} on poikkileikkauksen osavarmuusluku. x_{target} on optimoinnin momentin prosentuaalinen kohdearvo täysin lujasta liitoksesta.

Optimointitehtävä muodostettiin kappaleessa 5 esitetyllä tavalla, käyttämättä kuitenkaan liitoksen kiertymäjäykkyyden rajoitusehtoja. Optimointitehtävän tiedot esitettynä alla

$$\min \quad C_T(\underline{x}) \quad (101)$$

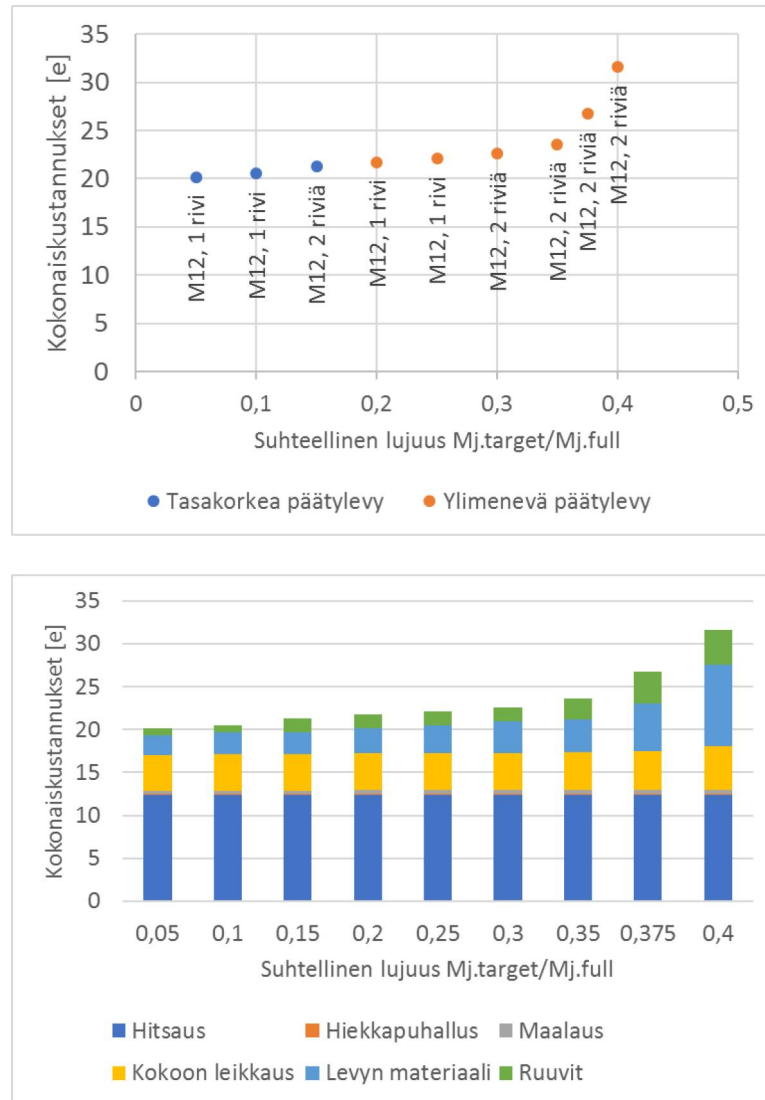
$$\begin{aligned} s. t. \quad & M_{j,Rd}(\underline{x}) \geq M_{j,target} \\ & e, m \geq \max(1.2d_0, 0.5d_w) \\ & p_{i,i+1} \geq \max(2.2d_0, d_w) \\ & w \geq 2.4d_0 \\ & \eta_{leikkaus}(\underline{x}) \leq 1.0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= \{t_p, e, z_r, d, n_r\} \\ d &\in [12, 16, 20, 24, 27, 30, 36] \\ n_r &\in [1, 2, 3, 4] \end{aligned}$$

jossa olevat muuttujat ja parametrit ovat esitettyinä tarkemmin kappaleessa 5. Lisäksi optimoinnissa on huomioitu liitoskonfiguraatio ylimenevällä päätylevyllä sekä palkin kanssa tasakorkealla päätylevyllä.

Momenttikapasiteetin vaikutuksen tulokset ovat esitettynä kuvassa (Kuva 61). Verrattuna kiertymisjäykkyyden vaikutukseen, momenttikapasiteetin vaikutus on hyvin samantapainen. Eroavaisuutena on, että momenttikapasiteetin kasvattaminen näkyy selvemmin kustannuksissa päätylevyn paksuuden kasvaessa ja ruuvirivien määrän sekä ruuvien koon kasvaessa. Kustannusoptimi saavutetaan myös momenttikapasiteetin tapauksessa mahdollisimman pienillä ruuveilla, päätylevyn paksuudella ja ruuvirivien määrällä. Pylväs-kuvaajasta nähdään, että myös momenttikapasiteetin kustannukset koostuvat samoista tekijöistä kuin kiertymisjäykkyyden tarkastelussa ja kustannuksista tehdyt huomiot kiertymäjäykkyyden tarkastelussa pätevät myös momenttikapasiteetin vaikutusta tarkasteltaessa. Sama pätee myös ruuvien leikkauskapasiteetin suhteen. Myöskään momenttikapasiteetin vaikutusten tarkastelussa liitokseen vaikuttavia leikkausvoimia ei ole otettu huomioon ja liitoksen leikkauskapasiteetti saattaa tulla määrääväksi pieniä ruuveja käytettäessä.

Selkeimpänä erona kiertymisjäykkyyden tarkasteluun verrattuna on, että kokonaiskustannukset kasvavat tasaisemmin momenttikapasiteetin kasvaessa. Suurempi momenttikapasiteetti saavutetaan päätylevyn paksuutta kasvattamalla ja/tai ruuvien kokoa ja ruuvirivien määrää kasvattamalla. Tarkastellussa tapauksessa jo pienemmillä momenttikapasiteetin arvoilla päätylevyn paksuutta joudutaan kasvattamaan käytetystä 5 mm minimiarvosta, jotta päästään haluttuun kapasiteetti arvoon.



Kuva 61. Momenttikapasiteetin vaikutus kustannusoptimiin.

Liitoksen maksimimomentin määrää tässä tapauksessa puristuspuolen kapasiteetti, joka määräytyy pilarin leikkauskapasiteetin mukaan. Suhteellisen lujuuden mukaan vahvistamattomana liitos voidaan saada maksimissaan vain osittain lujaksi ja täysin lujan liitoksen saamiseksi vähintään pilarin uumaa tulisi näin ollen vahvistaa. Pilarin uuman vahvisteena voitaisiin käyttää esimerkiksi N-, K- tai Morris jäykisteitä tai uuman lisälevyjä, mutta kyseiset jäykisteet lisäävät liitoksen kustannuksia huomattavasti ja siksi niitä tulisi välttää. Osittain jäykkiä liitoksia käyttämällä kuormitukset voidaan kuitenkin saada jaettua rakenteille niin, että jäykisteitä ei välttämättä tarvita.

7. YHTEENVETO

Tässä työssä keskityttiin jäykistämättömien päätylevyliitosten mitoittamiseen komponenttimenetelmällä ja liitosominaisuuksien ja -kustannusten tarkasteluun vertailututkimuksilla. Komponenttimenetelmä koodattiin työssä yleiseksi liitosmitoitusohjelmaksi, jonka avulla jäykistämättömät palkki-pilari päätylevyliitokset pystytään mitoittamaan helposti monelle eri liitoskonfiguraatiolle. Liitosmitoitusohjelma koodattiin standardin SFS EN 1993-1-8 [1] pohjalta ja kustannuslaskennassa käytettiin tutkimuksessa [2] esitettyjä kustannusfunktioita, jotka ottavat huomioon materiaalikustannukset sekä liitoksen valmistuskustannukset. Optimointi suoritettiin käyttämällä iteratiivista gradienttipohjaista SLSQP optimointialgoritmia [35].

Tehtyjen tarkastelujen pohjalta on selvää, että komponenttimenetelmä on monipuolinen ja soveltuu hyvin liitosten mitoitukseen. Komponenttimenetelmän vahvuutena on sen joustavuus ja komponenttimenetelmällä pystytään suhteellisen helposti määrittämään kapasiteetti sekä kiertymäjäykkyys monille eri liitoskonfiguraatioille. Standardissa SFS EN 1993-1-8 [1] esitetyt mitoituskaavat lisäksi yleisimmille liitosten peruskomponenteille, joten kyseisiä kaavoja voidaan soveltaa moneen eri liitostyyppiin. Näin ollen komponenttimenetelmän voidaan todeta olevan hyvin käyttökelpoinen jokapäiväisessä insinöörityössä ja monipuolisuuden kautta sopii erinomaisesti myös tutkimustyöhön. Liitosmitoitus pystytään myös parametrisoimaan helposti käyttämällä komponenttimenetelmää, jolloin myös liitoksien optimointi pystytään tekemään tehokkaasti.

Yksi tärkeimmistä komponenttimenetelmän vahvuuksista on mahdollisuus määrittää myös liitosten kiertymäjäykkyydet, jolloin myös rakenteet pystytään mallintamaan tarkemmin. Kiertymäjäykkyyksien huomioimisella rakenteista saadaan helpommin kustannustehokkaita ja rakenneosien kuormitusten oikeellisuudesta voidaan olla varmempia. Kiertymäjäykkyyksien huomioiminen kuitenkin hankaloittaa ja monimutkaistaa mitoittamista ja yleisesti mitoitus tehdään perinteisellä tavalla yksinkertaistamalla liitoksien jäykkyyden nivelellisiksi tai jäykiksi. Liitosjäykkyyksien huomioimisen yhdistämiseen rakenneosien mitoitukseen tulisi olla selkeä mitoitus tapa ja aihe vaatii lisää tutkimusta.

Komponenttimenetelmän yksi suurimmista vahvuuksista ja heikkouksista on sen monipuolisuus. Komponenttien suurella määrällä liitoksen toiminta saadaan määritettyä tarkasti monenlaisille liitoskonfiguraatioille, mutta tämä samalla myös hankaloittaa ja hidastaa komponenttimenetelmän käyttöä. Standardin SFS EN 1993-1-8 [1] esittämän komponenttimenetelmän käyttö analyyttisesti on erittäin hidasta, jos mitoittavia liitoksia on suuri määrä ja samaa liitoskonfiguraatiota ei pystytä käyttämään monessa liitoksessa. Suurin hyöty komponenttimenetelmästä saadaan irti käyttämällä valmiiksi koodattua liitosmitoitusohjelmaa, jolloin hyödynetään komponenttimenetelmän monipuolisuus

sekä tehokkuus. Tehtyjen tarkastelujen mukaan kuitenkin vahvistamattomien palkki-pilari päätylevyliitoksien maksimi momenttikapasiteettia pystytään analyyttisesti helposti arvioimaan puristuspuolen kapasiteetin ja ruuvien vetokapasiteetin mukaan. Jäykistämätömissä päätylevyliitoksissa usein puristuspuoli tulee määrääväksi suurien momenttikapasiteettien vaadittaessa ja vetopuolen maksimi kapasiteetti määräytyy selvästi ruuvien vetokapasiteetin mukaan. Molemmat näistä on suhteellisen helppo määrittää. Päätylevyliitoksen kiertymisjäykkyyden arvioimiseen suuntaa antavasti analyyttisesti ei valitettavasti komponenttimenetelmässä ole nopeaa tapaa, sillä jokainen komponentti vaikuttaa liitoksen momentti-kiertymäyhteyteen. Kiertymäjäykkyyden alustavaan arvioimiseen analyyttisesti voidaan mahdollisesti käyttää esimerkiksi empiirisiä liitosmitoitustalleja, jotka ovat usein nopeita käyttää, mutta sopivat tietyille liitostyypeille ja liitoskonfiguraatioille.

Kiertymäjäykkyyden maksimi-arvon tarkastelussa huomattiin myös epäintuitiivinen piirre, että liitoksen kiertymäjäykkyyttä ei välttämättä saada lisää ruuvirivejä lisäämällä. Ruuvirivien lisäämisellä momenttikapasiteettia pystytään aina saamaan lisää, mutta kiertymäjäykkyyteen vaikuttavat veto- ja puristuspuolen jäykkyydet sekä sisäinen momenttivarasi. Uloimman ruuvirivin alle ruuvirivejä lisäämällä sekä vetopuolen että puristuspuolen jäykkyys kasvaa, mutta samalla myös liitoksen sisäinen momenttivarasi pienenee. Liitoksen sisäisellä momenttivarrella on suuri merkitys liitoksen kiertymäjäykkyyteen, sillä momenttivarasi vaikuttaa toiseen potenssiin kiertymäjäykkyyden määrityksessä. Lisäksi veto- ja puristuspuoli toimivat sarjassa liitoksen kiertyessä, jolloin sarjaan kytkettyjen jousien yhteenlaskuperiaatteiden mukaisesti kokonaisjäykkyys on pienempi kuin yhdenkään sarjassa olevan jousen jäykkyys. Näin ollen jäykkyyden lisäys ei suhteessa välttämättä ole riittävä.

Kustannusoptimoinnissa liitoksien kustannusten huomattiin selkeästi koostuvan muutamien määrävään kustannustekijän mukaan. Vahvistamattomissa päätylevyliitoksissa suurimmat kustannukset aiheutuvat materiaalikustannuksista, hitsauksesta ja levyn leikkaamisesta. Hiekkapuhallus- ja maalaus-kustannukset ovat suhteessa muihin kustannustekijöihin niin pienet, että niiden vaikutus ei merkittävästi vaikuta kustannuksiin. Tässä työssä jälkitarkastus oletettiin tehtäväksi kaikissa tapauksissa visuaalisesti, jolloin jälkitarkastuksesta ei aiheudu kustannuksia.

Määrävistä kustannustekijöistä hitsauskustannuksia pystyttäisiin pienentämään selvästi. Perinteisesti hitsit mitoitetaan palkin kanssa tasalujaksi, jolloin hitsit eivät voi tulla määräväksi missään tapauksessa. Tämä kuitenkin johtaa luultavimmin ylimitoitukseen, sillä liitokseen vaikuttava momentti ja siten liitokselta vaadittu kapasiteetti on lähes aina palkin momenttikapasiteettia selvästi pienempi. Näin ollen hitsauskustannuksia pystyttäisiin mahdollisesti pienentämään huomattavasti mitoittamalla hitsit liitokseen vaikuttavien kuormien mukaan. Vaarana kuormien mukaan mitoittamisessa on kuitenkin hitsien tuleminen määräväksi liitoksen kapasiteetissa. Yksi tapa on mitoittaa hitsit kuormien mukaan ja tarkistaa lopuksi, että hitsit eivät ole määrävä komponentti. Tämä kuitenkin joh-

taa helposti iteratiiviseen liitosmitoittamiseen, sillä hitsien koko vaikuttaa myös reunaetäisyyksiin ja siten myös liitoksen kapasiteettiin ja kiertymäjäykkyyteen. Iteroivan mitoittamisen välttämiseksi hitsien mitoittamisessa kuormitusten mukaan voidaan esimerkiksi käyttää mitoituksessa vielä ylimääräistä varmuuskerrointa, jolla varmistetaan, että hitsit eivät tule määrääviksi.

Myös levyn leikkauskustannuksiin ja materiaalikustannuksiin pystytään vaikuttamaan helposti liitosmitoituksen yhteydessä. Ruuvien koko kannattaa valita mahdollisimman pieneksi, sillä pienillä ruuveilla sekä ruuvien materiaalikustannukset, että levyn leikkauskustannukset ovat minimissään. Päätylevyn materiaalin hinta tulee suoraan tilavuuden mukaan, jolloin päätylevyn paksuuden kasvattaminen näkyy selvästi materiaalikustannuksissa. Ruuvit kannattaa yleisesti ottaen sijoittaa lähelle tukevia osia (pilarin ja palkin uuma ja laipat), jolloin ruuvien ja T-osien kapasiteetti sekä jäykkyys saadaan mahdollisimman suuriksi ja näin myös päätylevyn paksuus saadaan minimiin.

Vaaditun momenttikapasiteetin ja kiertymäjäykkyyden vaikutus optimoidun liitoksen kustannuksiin vaikuttaa tarkastelujen mukaan merkittävästi vasta lähellä liitoksen maksimi momenttikapasiteettia/kiertymäjäykkyyttä (Kuva 60 ja Kuva 61). Lähellä maksimia ruuvien suurentaminen ja päätylevyn paksuuden kasvattaminen nostavat liitoksen kustannuksia selvästi, kun taasen pienemmällä momenttikapasiteetin ja kiertymäjäykkyyden arvoilla kustannukset pysyvät lähes vakioina. Momenttikapasiteetin ja kiertymäjäykkyyden vaikutus voidaan mallintaa yksinkertaistetusti kappaleessa 6.3 esitettyjä kuvaajia käyttäen. Näin ollen erilaisille liitoksille pystytään muodostamaan kustannus-kiertymäjäykkyys ja kustannus-momenttikapasiteetti yhteydet eri palkki-pilari ko'ille käyttämällä tässä työssä käytettyä kustannusoptimointimenetelmää.

Kustannusoptimointien mukaan kiertymäjäykkyyttä ja momenttikapasiteettia omaavaa liitosta haettaessa kustannustehokkain liitos saadaan ylimenevällä päätylevyllä kahta ruuviriviä käyttämällä, yksi ruuvirivi molemmiin puolin palkin vedettyä laippa. Nivellemäistä liitosta haettaessa kustannustehokkaimpaan liitokseen päästään pienellä päätylevyn paksuudella ja sijoittamalla ruuvirivit lähellä puristuskeskiötä. Huomioitavaa molemmissa tapauksissa on kuitenkin, että liitoksen leikkauskestävyys on riittävä ja että myös toisen suunnan kiertymäjäykkyys vastaa tehtyä oletusta jäykkyydestä. Varsinkin liitoksissa, joissa ruuvirivit sijoitetaan vain lähelle toista palkin laippaa, on toisen suunnan kiertymisjäykkyys huomattavasti suurempi/pienempi kuin mitoitettuun suuntaa. Muun muassa sivusiirtyvissä kehissä tämä voi johtaa tilanteeseen, jossa kuormituksen suunta vaihtuu liitoksessa ja liitoksen todellinen kiertymäjäykkyys ei enää vasta rakennemallissa käytettyä kiertymäjäykkyyttä. Liitosten mitoittamisessa ja kiertymäjäykkyyden määrittämisessä tulee siis ottaa huomioon liitoksen toiminta rakenteessa ja tarvittaessa mitoittaa liitokset erikseen molemmille kuormitus suunnille. Esimerkiksi kappaleessa 6.2 esitetyt kustannusoptimoidut liitokset eivät välttämättä ole hyvä ratkaisu, sillä liitokset luokitellaan luul-

tavimmin nivelliseksi liitoksen toiseen suuntaan. Tehdyssä tarkastelussa on kuitenkin oletettu kuormituksen suunnan pysyvän aina samaan suuntaan, jolloin liitoksen tasossa toisen suunnan kiertymisjäykkyyttä ei tarvitse ottaa huomioon.

Tarkastelujen mukaan päätylevyliitosten optimointi pystytään hoitamaan tehokkaasti käyttämällä myös gradienttipohjaisia menetelmiä ja liitoksien optimoinnin jako diskreettien muuttujien mukaan osatehtäviin on toimiva ratkaisu, kun diskreettien muuttujien määrä ei ole suuri. Tässä työssä kuitenkin myös päätylevyn paksuus pidettiin jatkuvana muuttujana, vaikka todellisuudessa levyn paksuudet ovat myös diskreetit. Koko liitoksen optimointi kaikille todellisuudessa diskreeteille muuttujille olisi luultavimmin järkevintä tehdä käyttäen heuristista optimointialgoritmia ja tulevaisuissa tutkimuksissa vertailu eri optimointialgoritmien käytön tehokkuudesta olisi järkevää.

7.1 Esitetyt jatkotutkimukset

Tässä työssä keskityttiin jäykistämättömien yksipuolisten palkki-pilari päätylevyliitosten tarkasteluun. Tulevaisuissa tutkimuksissa tarkasteluun tulisi ottaa myös kaksipuoliset liitokset, palkki-palkki liitokset sekä jäykisteiden vaikutukset. Kustannusoptimoinnin osalta varsinkin jäykisteiden vaikutus on erittäin mielenkiintoinen niiden tuodessa luultavimmin selvästi lisää kustannuksia. Tässä työssä saatujen tulosten mukaan jäykistämättöminä päätylevyliitoksia ei välttämättä saada jäykiksi edes sivusiirtymättömissä kehissä, joten jäykisteiden vaikutuksesta kustannuksiin tulisi tarkastella kustannustehokkaiden liitosten mitoittamiseksi. Lisäksi esimerkiksi leikkauspalan vaikutus liitoksen kustannuksiin olisi tulisi huomioida, sillä leikkauspala käytetään yleisesti liitoksen leikkausvoiman kantamisessa. Työssä tehty liitosmitoitushjelma on tehty yleiseksi, joten kyseiset lisäykset pystytään tekemään suoraan liitosmitoitushjelmaan.

Liitosmitoitus tehdään usein perinteiselle tavalla yksinkertaistamalla liitoksien jäykkyys joko täysin jäykiksi tai nivelellisiksi ja mitoittamalla liitoksen rakenneosien mitoituksen jälkeen, vaikka kustannusoptimin rakenteen saamiseksi liitoksien jäykkyydet tulisi ottaa huomioon. Liitosmitoituksen ja optimoinnin yhdistämisestä rakenteen mitoittamiseen ja optimointiin ei kuitenkaan ole selkeää hyväksi todettua menetelmää. Näin ollen jatkotutkimuksissa liitosmitoituksen yhdistämisestä rakenneosien mitoitukseen tulisi tehdä tutkimusta. Tässä työssä tehty liitosmitoitushjelman soveltuu liitettäväksi rakenneosien mitoitukseen, joka antaa pohjan ainakin päätylevyliitoksin valmistettujen kehärakenteiden rakenneosien sekä liitosten yhteisen kustannusoptimoinnin tarkasteluun.

Työssä keskityttiin H- ja I-poikkileikkauksisten rakenneosien välisten päätylevyliitosten tarkasteluun, mutta komponenttimenetelmä soveltuu käytettäväksi myös muiden liitostyyppien tarkasteluun. Tulevaisuissa tutkimuksissa laskentaohjelma voitaisiin laajentaa myös pilarien pohjalevyliitosten, ripalevyliitosten ja RHS sekä CHS poikkileikkauksisten ra-

kenneosien päätylevyliitosten mitoittamiseen. Kyseisistä ainakin pilarien pohjalevyliitoksen ja ripalevyliitoksen ovat laajalti käytettyä, mutta kummassakin tapauksessa liitosjäykkyys yksinkertaistetaan usein joko nivelelliseksi tai jäykäksi.

LÄHTEET

- [1] EN 1993-1-8, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-8: Design of joints, CEN, Brussels, 2005
- [2] Haapio J., Feature based cost estimation of steel structures, Tampere University of Technology, 2010
- [3] Cabrero J. M., Bayo E., Development of practical design methods for steel structures with semi-rigid connections 27, s.1125-1137, Engineering Structures 2005
- [4] Haapio J., Heinisuo M., Minimum cost steel beam using semi-rigid joints, Journal of Structural Mechanics 43, s. 1-11, 2010
- [5] Bel Hadj Ali N., Sellami M., Cutting-Decelle A.F., Mangi J.C., Multi-stage production cost optimization of semi-rigid steel frames using genetic algorithms, Engineering Structures 31, s. 2766-2778, 2009
- [6] Bel Hadj Ali N., Mangin J.C., Cutting-Decelle A.F., An overall approach to structural design of steelworks using genetic algorithms, System-based vision for strategic and creative design—Proceedings of the 2nd international conference on structural and construction engineering, 2003
- [7] Simões L.M.C., Optimization of frames with semi-rigid connections., Computers & Structures 60, s. 531-539, 1996
- [8] Díaz C., Victoria M., Querin O.M., Martí P., Optimum design of semi-rigid connections using metamodels, Journal of Constructional Steel Research 78, s. 97-106, 2012
- [9] P398 Joints in steel construction – Moment-resisting joints to Eurocode 3, The steel construction institute and The British constructional steelwork association limited, 2013
- [10] Braham M., Jaspart J.P., Is it safe to design a building structure with simple joints, when they are known to exhibit a semi-rigid behavior?, Journal of Constructional Steel Research 60, s. 713-723, 2004
- [11] Thai H-T., Uy B., Kang W-H., Hicks S., System reliability evaluation of steel frames with semi-rigid connections, Journal of Constructional Steel Research 121, s. 29-39, 2016

- [12] Díaz C., Martí P., Victoria M., Querin O.M., Review on the modelling of joint behaviour in steel frames, *Journal of Constructional Steel Research* 67, s. 741-758, 2011
- [13] Xu L., On the minimum-maximum bending moment and the least-weight design of semi-rigid beams, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 21, s. 316-321, 2001
- [14] Zoetemeijer P., A design method for the tension side of statically loaded, bolted beam-to-column connections, *HERON* vol. 20, 1974
- [15] Francavilla A.B., Latour M., Piluso V., Rizzano G., Design of full-strength full-ductility extended end-plate beam-to-column joints, *Journal of Constructional Steel Research* 148, s. 77-96, 2018
- [16] Zhu C., Rasmussen K.J.R., Zhang H., Moment-rotation behavior of bolted moment end-plate, *Proceedings of the Eighth International Workshop - Connections in steel structures* 8, s. 173-203, 2016
- [17] EN 1990, Eurocode : Basis of structural design, CEN, Brussels, 2001
- [18] Design of structural connections to Eurocode 3 – Frequently asked questions, 2003, http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/CESTRUCO/_aa_Textbook.htm, viitattu 26.4.2018
- [19] Weynand K., Jaspart J-P., Design of structural steel joints, 2014, http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/2014_07_WS_Steel/presentations/07_Eurocodes_Steel_Workshop_WEYNAND.pdf, viitattu 20.4.2018
- [20] Birkeland I., Aalberg A., Kvam S., Classification boundaries for stiffness of beam-to-column joints and column bases, *Nordic Steel Construction Conference*, 2012
- [21] Design of multi-storey frames with partial strength and semi-rigid connections, <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/esdep/master/wg14/l1300.htm>, viitattu 12.6.2018
- [22] Sokol Z., Modeling of Stiffness and Resistance of Tension Part of Column Bases, in *Czech, CTU Prague, Prague*, 2000
- [23] Stark J.W.B., Criteria for the use of preloaded bolts in structural joints, *Connections in Steel Structures III – Behaviour, Strength and Design*, s. 431-440, 1996
- [24] Ongelin P., Valkonen I., Hitsatut profiilit EN 1993-käsikirja, Rautaruukki Oyj, 2010

- [25] Evers H.G.A, Maatje I.F., Cost based engineering and production of steel constructions, *Connections in steel structures* 4, s. 14-22, 2000
- [26] Kameshki E.S., Saka M.P., Optimum design of nonlinear steel frames with semi-rigid connections using a genetic algorithm, *Computers and Structures* 79, s. 1593-1604, 2001
- [27] Al-Salloum Y.A., Almusallam T.H., Optimality and safety of rigidly- and flexibly-jointed steel frames, *Journal of Constructional Steel Research* 35, s. 189-215, 1995
- [28] Sánchez-Olivares G., Espín A.T., Design of planar semi-rigid steel frames using genetic algorithms and Component Method, *Journal of Constructional Steel Research* 88, s. 267-278, 2013
- [29] Truong V-H, Kim S-E., A robust method for optimization of semi-rigid steel frames subject to seismic loading, *Journal of Constructional Steel Research* 145, s. 184-195, 2018
- [30] Pavlovčič L., Krajnc A., Beg D., Cost function analysis in the structural optimization of steel frames, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 28, s. 286-295, 2004
- [31] Alberdi R., Khandelwal K., Comparison of robustness of metaheuristic algorithms for steel frame optimization, *Engineering Structures* 102, s. 40-60, 2015
- [32] Alberdi R., Murren P., Khandelwal K., Connection topology optimization of steel moment frames using metaheuristic algorithms, *Engineering Structures* 100, s. 276-292, 2015
- [33] Truong V.H., Nguyen P.C., Kim S.E., An efficient method for optimizing space steel frames with semi-rigid joints using practical advanced analysis and the microgenetic algorithm, *Journal of Constructional Steel Research* 125, s. 416-427, 2017
- [34] Hayalioglu M.S., Degertekin S.O., Minimum cost design of steel frames with semi-rigid connections and column bases via genetic optimization, *Computers and Structures* 83, s. 1849-1863, 2005
- [35] https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.fmin_slsqp.html#scipy.optimize.fmin_slsqp, viitattu 24.5.2018
- [36] Dieter K., A software package for sequential quadratic programming, *Institute für Dynamik der Flugsysteme*, 1988

- [37] Carter C.J., Murray T.M., Thornton W.A., Cost-effective steel building design, Progress in Structural Engineering and Materials, 2000
- [38] Steenhuis M., Gresnigt N., Weynand K., Pre-design of semi-rigid joints in steel frames, Proceedings of the Second State of the Art Workshop, 1994
- [39] Hadidi A., Rafiee A., A new Hybrid Algorithm for Simultaneous Size and Semi-rigid Connection Type Optimization of Steel Frames, International Journal of Steel Structures 15, s. 89-102, 2015

LIITE A: PÄÄTYLEVYLIITOKSEN KIERTYMÄJÄYKKYYDEN JOHTAMINEN JOUSIMALLISTA

Lähdetään hakemaan liitoksen kiertymäjäykkyyttä tarkastelemalla ensin vain vetopuolta. Kuvassa alla vetopuoli kahdella jousella. Tavoitteena on johtaa kiertymäjäykkyyden alkuarvo, joten ollaan liitoksen lineaarisella alueella. Näin ollen jousien venymät voidaan olettaa olevan lineaarisesti jakautuneita, jolloin saadaan

$$\Delta_2 = \frac{z_2}{z_1} \Delta_1 \rightarrow \Delta_r = \frac{z_r}{z_1} \Delta_1 \quad \text{yleistettynä}$$

Jousille tiedetään venymä-voima yhteys

$$F = k\Delta$$

Päätylevyliitosten yhteydessä peruskomponenttien jäykkyys esitetään komponenttien materiaalin kimmokertoimen ja komponentin jäykkyyttä vastaavan ekvivalentin venymäpituuden avulla. Näin ollen saadaan

$$F_r = E_r k_r \Delta_r$$

Liitoksen momentti-kiertymäyhteys vain vetopuolta tarkasteltuna kaavasta

$$S_j = \frac{M}{\theta}$$

jossa momentti saadaan jousille tulevien voimien avulla. Liitoksen kiertymä saadaan jousien venymien avulla kaavasta

$$\tan \theta = \frac{\Delta_1}{z_1} \rightarrow \theta \approx \frac{\Delta_1}{z_1} \quad \text{olettaen pienet siirtymät}$$

$$\Rightarrow S_j = \frac{M}{\theta} = \frac{\sum_r F_r z_r}{\theta} = \frac{\sum_r E_r k_r \Delta_r z_r}{\frac{\Delta_1}{z_1}} = \frac{\sum_r E_r k_r \frac{z_r}{z_1} \Delta_1 z_r}{\frac{\Delta_1}{z_1}} = \sum_r E_r k_r z_r^2$$

Lisäksi olettaen kaikkien komponenttien materiaaliksi teräs saadaan kimmokerroin siirrettyä summalausekkeen ulkopuolelle

$$\Rightarrow S_j = E \sum_r k_r z_r^2, \text{ joka ottaa huomioon vain vetopuolen vaikutuksen.}$$

Puristuspuolen huomioimiseksi tarvitaan vetopuoli esittää ekvivalentin jousen avulla, jonka kanssa vetopuoli toimii sarjassa. Vetopuolen jouset toimivat liitoksen kiertyessä rinnan, joten jousien yhteenlaskusääntöjen mukaan vetopuolen jousien vaikutus voidaan summata yhteen. Näin ollen vetopuolen jousista voidaan muodostaa ekvivalentti jousi,

jonka aiheuttama kiertymäjousi(/jäykkyys) on yhtä suuri kuin vetopuolen komponenttien yhteen laskettu jäykkyys

$$k_{eq} z_{eq} = \sum_r k_r z_r \rightarrow k_{eq} = \frac{\sum_r k_r z_r}{z_{eq}}$$

Lisäksi yksittäisten jousien aiheuttama momentti ja ekvivalentin jousen aiheuttama momentti tulee olla yhtä suuret, joten saadaan

$$\sum_r M_r = M_{eq} \rightarrow \sum_r E_r k_r \Delta_r z_r = E_{eq} k_{eq} \Delta_{eq} z_{eq}$$

Kaavassa kimmokertoimet ovat yhtä suuret, joten kimmokerroin voidaan supistaa pois. Muuten edellä esitettyjen kaavojen mukaan saadaan

$$\begin{aligned} \sum_r k_r \Delta_r z_r &= k_{eq} \Delta_{eq} z_{eq} \\ \rightarrow \sum_r k_r \frac{z_r}{z_1} \Delta_1 z_r &= k_{eq} \frac{z_{eq}}{z_1} \Delta_1 z_{eq} \\ \rightarrow \sum_r k_r z_r^2 &= k_{eq} z_{eq}^2 \\ \rightarrow \sum_r k_r z_r^2 &= \frac{\sum_r k_r z_r}{z_{eq}} z_{eq}^2 \\ \rightarrow z_{eq} &= \frac{\sum_r k_r z_r^2}{\sum_r k_r z_r} \end{aligned}$$

Näin ollen käyttämällä ekvivalenttia joustia saadaan

$$\Rightarrow S_j = E k_{eq} z_{eq}^2$$

Ekvivalentin vetopuolen jousen ollessa tiedossa, voidaan myös puristuspuolen vaikutus ottaa huomioon. Liitoksen kiertyessä veto- ja puristuspuoli toimivat sarjassa ja jousien yhteenlaskusääntöjen mukaan saadaan

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_{comp}} + \frac{1}{k_{eq}} \rightarrow k = \frac{1}{\frac{1}{k_{comp}} + \frac{1}{k_{eq}}} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_i}}$$

ja näin ollen liitoksen alkukiertymäjäykkyudeksi saadaan

$$\Rightarrow S_{j.ini} = \frac{E z_{eq}^2}{\sum_i \frac{1}{k_i}}$$

LIITE B: KUSTANNUSFUNKTIOIDEN TIEDOT

Haapion esittämien kustannusfunktioiden tiedot.

Materiaalikustannukset

	c_{SMBP}	[e/tonni]
		1.169
	c_{SMG}	[€/tonni]
S235		0
S355		35
	c_{SMT}	[€/tonni]
$5\text{ mm} \leq t < 6\text{ mm}$		140
$6\text{ mm} \leq t < 7\text{ mm}$		82
$7\text{ mm} \leq t < 8\text{ mm}$		35
$8\text{ mm} \leq t < 10\text{ mm}$		23
$10\text{ mm} \leq t < 12\text{ mm}$		12
$12\text{ mm} \leq t < 15\text{ mm}$		0
$15\text{ mm} \leq t < 20\text{ mm}$		0
$20\text{ mm} \leq t < 40\text{ mm}$		12
$40\text{ mm} \leq t < 50\text{ mm}$		12
$50\text{ mm} \leq t < 60\text{ mm}$		47
$60\text{ mm} \leq t < 80\text{ mm}$		58
	c_{SMQ}	[€/tonni]
< 5 000 kg		64
< 10 000 kg		34
< 15 000 kg		8
> 15 000 kg		0
	c_{SMQT}	[€/tonni]
< 2 000 kg		N/A
< 3 000 kg		90
< 5 000 kg		33
> 5 000 kg		0
	c_{SMUT}	[€/tonni]
N/A		0
S0+E0		44
S1+E1		48
S2+E2		69
S3+E3		73
100% S1+E2		76

c_{SMBP} on materiaalin perushinta, c_{SMG} on materiaalilaadun mukainen lisä, c_{SMT} on levyn paksuuslisä, c_{SMQ} on levymäärälisä, c_{SMQT} on levynpaksuuden levymäärän lisä ja c_{SMUT} on ultraäänitarkastuslisä

Haapion esittämät ruuvien c_{Bi} , mutterien c_{Ni} ja aluslevyjen c_{wi} yksikkökustannukset

DIN931, partially threaded
Hexacon 8.8 Hot dip galvanised

	[€/pcs]					
Length	M12	M16	M20	M24	M30	M36
20	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
25	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
35	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
40	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
45	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
50	0.39	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
55	0.50	0.78	N/A	N/A	N/A	N/A
60	0.45	0.83	N/A	N/A	N/A	N/A
65	0.56	0.89	1.57	N/A	N/A	N/A
70	0.51	0.94	1.61	N/A	N/A	N/A
75	N/A	1.00	1.70	2.96	N/A	N/A
80	0.58	1.04	1.78	3.01	N/A	N/A
90	0.64	1.16	1.96	3.32	6.99	N/A
100	0.71	1.26	2.11	3.61	7.40	N/A
110	0.76	1.41	2.32	3.89	7.77	N/A
120	0.83	1.53	2.50	4.16	8.14	17.46
130	0.92	1.63	2.65	4.35	8.66	17.65
140	0.99	1.73	2.83	4.63	9.38	18.24
150	1.04	1.86	2.98	4.82	9.85	N/A
160	1.18	2.00	3.20	5.35	10.13	19.31
180	1.25	2.22	3.61	5.91	11.02	20.67
200	1.43	2.48	3.98	6.34	11.78	21.84
220	2.06	3.15	6.94	7.45	12.47	N/A
240	3.28	3.38	7.35	10.11	N/A	24.57
260	3.57	3.91	10.59	12.97	18.47	N/A
280	N/A	5.26	N/A	13.63	N/A	26.72
300	N/A	5.69	11.43	14.07	20.07	N/A

DIN933, fully threaded
Hexacon bolt 8.8 hot dip galvanised

	[€/pcs]					
Length	M12	M16	M20	M24	M30	M36
20	0.26	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
25	0.22	0.49	N/A	N/A	N/A	N/A
30	0.24	0.52	0.93	N/A	N/A	N/A
35	0.26	0.55	1.28	N/A	N/A	N/A
40	0.30	0.58	1.01	2.58	N/A	N/A
45	0.32	0.61	1.13	N/A	N/A	N/A
50	0.36	0.65	1.14	2.78	N/A	N/A
55	N/A	0.72	1.30	2.83	N/A	N/A
60	0.39	0.73	1.36	2.91	5.73	N/A
65	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
70	0.45	1.04	2.00	3.04	6.09	14.06
75	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
80	0.64	1.21	2.26	3.30	6.44	N/A
90	0.84	1.51	2.32	3.73	6.70	N/A
100	0.92	2.40	2.39	3.85	7.88	16.08
110	N/A	N/A	N/A	N/A	8.76	N/A
120	1.27	2.54	N/A	4.80	12.60	19.58
130	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
140	1.36	5.64	N/A	N/A	13.70	N/A
150	N/A	N/A	6.70	9.80	N/A	N/A
160	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
180	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	27.56
200	N/A	N/A	7.50	N/A	25.30	N/A
220	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
240	N/A	N/A	N/A	16.25	N/A	N/A
260	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
280	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
300	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

DIN 934-8/10

Nut, hot dip galvanised

[€/pc]

M12	M16	M20	M24	M30	M36
0.10	0.27	0.54	0.98	2.13	4.45

DIN 7989

Washer, hot dip galvanised

[€/pc]

DIN 125

M12	M16	M20	M24	M30	M36
0.30	0.46	0.65	0.82	1.41	1.76

Levyn hiekkapuhallus

c_{LB}	0.46	[€/min]
c_{EqB}	0.13	[€/min]
c_{MB}	0.01	[€/min]
c_{REB}	0.16	[€/min]
c_{SeB}	0.24	[€/min]
c_{CB}	0.02	[€/min]
c_{EnB}	0.07	[€/min]
u_B	1.0	[-]

Levyn leikkaus

T_{NCu}	3.00	[min]
c_{LCu}	0.92	[€/min]
c_{EqCu}	0.19	[€/min]
c_{MCu}	0.01	[€/min]
c_{RECu}	0.08	[€/min]
c_{SeCu}	0.12	[€/min]
c_{EnCu}	0.12	[€/min]
u_{Cu}	1.0	[-]

Hitsaus

T_{PTA}	1.59	[min]
c_{LPA}	0.46	[€/min]
c_{EqPA}	0.01	[€/min]
c_{MPA}	0.01	[€/min]
c_{REPA}	0.03	[€/min]
c_{SePA}	0.04	[€/min]
c_{EnPA}	0.01	[€/min]
u_{PA}	1.0	[-]

Jälkitarkastus

c_{LPT}	0.46	[€/min]
c_{REPT}	0.03	[€/min]
c_{SePT}	0.04	[€/min]
u_{PT}	1.0	[-]

Maalaus

c_{LP}	0.46	[€/min]
c_{REP}	0.03	[€/min]
c_{SeP}	0.04	[€/min]
u_P	1.0	[-]

LIITE C: Ruuvirivin lisäämisen vaikutus kiertymäjäykkyyteen, vain yksi ruuvirivi, laskentapohja

Osavarmuuskertoimet

$$\gamma_{M0} := 1.0 \quad \gamma_{M1} := 1.0 \quad \gamma_{M2} := 1.25$$

Pilarin, palkin ja päätylevyn materiaali

$$f_y := 275 \cdot \text{MPa} \quad f_u := 430 \cdot \text{MPa} \quad E := 210 \cdot \text{GPa} \quad \nu := 0.3 \quad \rho := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Pilari HE 220 B

$$h_c := 220 \cdot \text{mm} \quad b_c := 220 \cdot \text{mm} \quad t_{fc} := 16 \cdot \text{mm} \quad t_{wc} := 9.5 \cdot \text{mm} \quad r_c := 18 \cdot \text{mm}$$

$$d_{wc} := h_c - 2 \cdot (t_{fc} + r_c) = 152 \cdot \text{mm}$$

$$A_c := 9104.124 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{vc} := A_c - 2 \cdot b_c \cdot t_{fc} + t_{fc} \cdot (t_{wc} + 2 \cdot r_c) = 2792.124 \cdot \text{mm}^2$$

Palkki

$$h_b := 500 \cdot \text{mm} \quad b_b := 200 \cdot \text{mm} \quad t_{fb} := 16 \cdot \text{mm} \quad t_{wb} := 10.2 \cdot \text{mm} \quad r_b := 21 \cdot \text{mm}$$

$$d_{wb} := h_b - 2 \cdot (t_{fb} + r_b) = 426 \cdot \text{mm}$$

$$A_b := 11552.158 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{vb} := A_b - 2 \cdot b_b \cdot t_{fb} + t_{fb} \cdot (t_{wb} + 2 \cdot r_b) = 5987.358 \cdot \text{mm}^2$$

$$W_{pl,y} := 2194117.98 \cdot \text{mm}^3$$

$$M_{c,Rd} := \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 603.382 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Päätylevy

$$t_p := 12 \cdot \text{mm} \quad h_p := 554 \cdot \text{mm} \quad b_p := b_b = 200 \cdot \text{mm} \quad l_{up} := 27 \cdot \text{mm} \quad l_{lo} := 27 \cdot \text{mm}$$

$$z_{cc} := h_p - l_{lo} - 0.5 \cdot t_{fb} = 519 \cdot \text{mm}$$

Ruuvit

Käytetään M24 ruuveja lujuusluokalla 8.8

$$d := 24 \cdot \text{mm}$$

$$d_0 := \begin{cases} d + 1 \cdot \text{mm} & \text{if } d \leq 12 \cdot \text{mm} \\ d + 2 \cdot \text{mm} & \text{if } 12 \cdot \text{mm} < d < 30 \cdot \text{mm} \\ d + 3 \cdot \text{mm} & \text{otherwise} \end{cases} = 26 \cdot \text{mm}$$

$$f_{yb} := 0.8 \cdot 800 \cdot \text{MPa} = 640 \cdot \text{MPa} \quad f_{ub} := 800 \cdot \text{MPa}$$

Jätetään leikkausvoimien tarkastelu pois, jotenka vain ruuvin vetokapasiteetti tarvitaan

$$k_2 := 0.9 \quad A_s := 353 \cdot \text{mm}^2$$

$$F_{t,Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 203.328 \cdot \text{kN} \quad \text{Yhden ruuvin vetokapasiteetti}$$

Ruuvin jäykkyys ruuvin venymäpituuden mukaan

$$h_{nut} := 0.925d = 22.2 \cdot \text{mm} \quad h_{bolt} := 0.625 \cdot d = 15 \cdot \text{mm}$$

$$L_b := 0.5 \cdot (h_{nut} + h_{bolt}) + t_{fc} + t_p = 46.6 \cdot \text{mm}$$

$$k_{l0} := \frac{1.6 \cdot A_s}{L_b} = 12.12 \cdot \text{mm}$$

Päätylevyn hitsit

Määritetään hitsit tasalujiksi palkin kanssa, levynpaksuuksien mukaan yksinkertaistettua mitotustapaa käyttäen hitseiksi saadaan

$$\beta_w := 0.85$$

$$a_w := \text{ceil} \left(\frac{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot f_y}{2 \cdot \gamma_{M0} \cdot f_u} \cdot \frac{t_{wb}}{\text{mm}} \right) \cdot \text{mm} = 7 \cdot \text{mm}$$

$$a_f := \text{ceil} \left(\frac{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot f_y}{2 \cdot \gamma_{M0} \cdot f_u} \cdot \frac{t_{fb}}{\text{mm}} \right) \cdot \text{mm} = 10 \cdot \text{mm}$$

Ruuvirivin tiedot

Tarkastellaan liitosta yhdellä ruuvirivillä. Pilarin laipan puolella ruuvirivi luokitellaan olevan *Muu reuna-ruuvirivi*. Päätylevyn puolella ensimmäinen ruuvirivi luokitellaan olevan *Palkin vedetyn laipan alapuolella oleva ensimmäinen ruuvirivi*.

$$e_p := 45 \cdot \text{mm}$$

$$w := b_p - 2 \cdot e_p = 110 \cdot \text{mm}$$

$$e_c := 0.5 \cdot (b_c - w) = 55 \cdot \text{mm}$$

$$m_p := 0.5 \cdot w - 0.5 \cdot t_{wb} - 0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 41.98 \cdot \text{mm}$$

$$m_c := 0.5 \cdot w - 0.5 \cdot t_{wc} - 0.8 \cdot r_c = 35.85 \cdot \text{mm}$$

$$e_{\min} := \min(e_p, e_c) = 45 \cdot \text{mm}$$

Liitos jatkuvan pilarin keskellä ja oletetaan kerroskorkeudeksi 4 m

$$e_1 := 4 \cdot \text{m}$$

Ensimmäisen ruuvirivin paikaksi päätylevyn yläreunasta valitaan

$$z_1 := 100 \cdot \text{mm}$$

$$m_2 := z_1 - l_{\text{up}} - t_{\text{fb}} - 0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_f = 45.686 \cdot \text{mm}$$

$$h_{r1} := z_{\text{cc}} - z_1 = 419 \cdot \text{mm}$$

Kapasiteetti ja jäykkyys

Pilarin uuman leikkaus

$$V_{\text{wp.Rd}} := \frac{0.9 \cdot f_y \cdot A_{\text{vc}}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{\text{M0}}} = 398.978 \cdot \text{kN}$$

Pilarin uuman leikkauksen jäykkyys pitää laskea sen jälkeen, kun liitoksen sisäinen momenttivarsi tiedetään.

Pilarin uuman poikittainen puristus

$$s_c := r_c \quad s_p := \min(2 \cdot t_p, t_p + l_{\text{lo}}) = 24 \cdot \text{mm}$$

$$b_{\text{eff.c.wc}} := t_{\text{fb}} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_f + 5 \cdot (t_{\text{fc}} + s_c) + s_p = 238.284 \cdot \text{mm}$$

Yksipuolinen liitos jatkuvan pilarin keskellä, taulukon 5.4 mukaan voidaan käyttää

$$\beta := 1 \quad \Rightarrow \quad \omega = \omega_1$$

$$\omega := \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \cdot \left(\frac{b_{\text{eff.c.wc}} \cdot t_{\text{wc}}}{A_{\text{vc}}} \right)^2}} = 0.734$$

$$\lambda_p := 0.932 \cdot \sqrt{\frac{b_{\text{eff.c.wc}} \cdot d_{\text{wc}} \cdot f_y}{E \cdot t_{\text{wc}}^2}} = 0.676$$

$$\rho_1 := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_p \leq 0.72 \\ \frac{\lambda_p - 0.2}{\lambda_p^2} & \text{otherwise} \end{cases} = 1$$

Jätetään tässä tarkastelussa liitokseen vaikuttavat kuormitukset huomioimatta, joten

$$k_{wc} := 1$$

$$F_{c.wc.Rd} := \min\left(\frac{\omega \cdot k_{wc} \cdot b_{eff.c.wc} \cdot t_{wc} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \frac{\omega \cdot k_{wc} \cdot \rho_l \cdot b_{eff.c.wc} \cdot t_{wc} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}\right) = 457.128 \cdot \text{kN}$$

$$k_2 := \frac{0.7 \cdot b_{eff.c.wc} \cdot t_{wc}}{d_{wc}} = 10.425 \cdot \text{mm}$$

Palkin uuman puristus

$$F_{c.fb.Rd} := \frac{M_{c.Rd}}{h_b - t_{fb}} = 1246.658 \cdot \text{kN}$$

Standardin mukaan palkin uuma on muihin komponentteihin nähden niin jäykkä, että se voidaan jättää kiertymisjäykkyyden laskennassa huomioimatta

Pilarin laipan taivutus

Edellä esitetyn mukaisesti pilarin laipan puolella ruuvirivi luokitellaan olevan *Muu reunan ruuvirivi*

$$l_{eff.cp.f} := \min(2 \cdot \pi \cdot m_c, \pi \cdot m_c + 2 \cdot e_1) = 225.252 \cdot \text{mm}$$

$$l_{eff.nc.f} := \min(4 \cdot m_c + 1.25 \cdot e_c, 2 \cdot m_c + 0.625 \cdot e_c + e_1) = 212.15 \cdot \text{mm}$$

$$\Rightarrow \begin{aligned} l_{eff.1f} &:= \min(l_{eff.nc.f}, l_{eff.cp.f}) = 212.15 \cdot \text{mm} && \text{jossa molemmille ruuviriveille yksinään} \\ & && \text{tarkasteltuna on samat T-osien efektiiviset} \\ l_{eff.2f} &:= l_{eff.nc.f} = 212.15 \cdot \text{mm} && \text{leveydet} \end{aligned}$$

Nyt ruuvirivin kapasiteetti pystytään laskemaan T-osan tietojen mukaan.

$$n_c := \min(e_{min}, 1.25 \cdot m_c) = 44.813 \cdot \text{mm}$$

Ruuvirivinä tarkasteltuna

$$M_{pl.1.Rd} := \frac{0.25 \cdot l_{eff.1f} \cdot t_{fc}^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 3.734 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m_c} = 416.607 \cdot \text{kN}$$

$$M_{pl.2.Rd} := \frac{0.25 \cdot l_{eff.2f} \cdot t_{fc}^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 3.734 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd} + n_c \cdot 2 \cdot F_{t.Rd}}{m_c + n_c} = 318.499 \cdot \text{kN}$$

$$F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd} = 406.656 \cdot \text{kN}$$

$$F_{fc.Rd.r1} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) = 318.499 \cdot \text{kN}$$

Ruuvirivin laipan taivutuksen jäykkyys saadaan määritettyä pienimmän efektiivisen leveyden mukaan, käyttäen ruuvirinä tai ruuviryhmänä tarkastelun pienintä efektiivistä leveyttä. Nyt vain yksi ruuvirivi, joten ruuviryhmiä ei voi muodostua

$$l_{\text{eff},f} := \min(l_{\text{eff},1f}, l_{\text{eff},2f}) = 212.15 \cdot \text{mm}$$

$$k_{4,r1} := \frac{0.9 \cdot l_{\text{eff},f} \cdot t_{fc}^3}{m_c^3} = 16.974 \cdot \text{mm} \quad \text{Molemmille ruuviriveille}$$

Pilarin uuman poikittainen veto

Pilarin uuman poikittainen veto tarkastellaan edellä määritettyjen tehollisten leveyksien mukaan.

Ruuvirivinä tarkasteltuna

$$b_{\text{eff},t,\text{wc},r} := \min(l_{\text{eff},1f}, l_{\text{eff},2f}) = 212.15 \cdot \text{mm}$$

$$\beta := 1 \quad \Rightarrow \quad \omega = \omega_1$$

$$\omega_r := \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \cdot \left(\frac{b_{\text{eff},t,\text{wc},r} \cdot t_{\text{wc}}}{A_{\text{vc}}} \right)^2}} = 0.772$$

$$F_{t,\text{wc},\text{Rd},r1} := \frac{\omega_r \cdot b_{\text{eff},t,\text{wc},r} \cdot t_{\text{wc}} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 427.946 \cdot \text{kN} \quad \text{Molemmille ruuviriveille}$$

$$F_{t,\text{wc},\text{Rd},r2} := F_{t,\text{wc},\text{Rd},r1}$$

Ruuvirivin pilarin uuman vedon jäykkyys saadaan määritettyä pienimmän efektiivisen leveyden mukaan, käyttäen ruuvirinä tai ruuviryhmänä tarkastelun pienintä efektiivistä leveyttä. Nyt vain yksi ruuvirivi, joten ruuviryhmiä ei voi muodostua

$$b_{\text{eff},t,\text{wc}} := \min(l_{\text{eff},1f}, l_{\text{eff},2f}) = 212.15 \cdot \text{mm}$$

$$k_{3,r1} := \frac{0.7 \cdot b_{\text{eff},t,\text{wc}} \cdot t_{\text{wc}}}{d_{\text{wc}}} = 9.282 \cdot \text{mm}$$

Päätylevyn taivutus

Ensimmäinen ruuvirivi - *Palkin vedetyn laipan alapuolella oleva ensimmäinen ruuvirivi*

$$l_{\text{eff},\text{cp},p,r1} := 2 \cdot \pi \cdot m_p = 263.771 \cdot \text{mm}$$

$$\lambda_1 := \frac{m_p}{m_p + e_p} = 0.483 \quad \Rightarrow \quad \alpha := 5.7$$

$$\lambda_2 := \frac{m_2}{m_p + e_p} = 0.525$$

$$l_{\text{eff.nc.p.r1}} := \alpha \cdot m_p = 239.288 \cdot \text{mm}$$

$$\Rightarrow l_{\text{eff.l.p.r1}} := \min(l_{\text{eff.cp.p.r1}}, l_{\text{eff.nc.p.r1}}) = 239.288 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{eff.2p.r1}} := l_{\text{eff.nc.p.r1}} = 239.288 \cdot \text{mm}$$

$$n_p := \min(e_{\text{min}}, 1.25 \cdot m_p) = 45 \cdot \text{mm}$$

$$M_{\text{pl.1.Rd}} := \frac{0.25 \cdot l_{\text{eff.l.p.r1}} \cdot t_p^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 2.369 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{\text{T.1.Rd}} := \frac{4 \cdot M_{\text{pl.1.Rd}}}{m_p} = 225.72 \cdot \text{kN}$$

$$M_{\text{pl.2.Rd}} := \frac{0.25 \cdot l_{\text{eff.2p.r1}} \cdot t_p^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 2.369 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{\text{T.2.Rd}} := \frac{2 \cdot M_{\text{pl.2.Rd}} + n_p \cdot 2 \cdot F_{\text{t.Rd}}}{m_p + n_p} = 264.858 \cdot \text{kN}$$

$$F_{\text{T.3.Rd}} := 2 \cdot F_{\text{t.Rd}} = 406.656 \cdot \text{kN}$$

$$F_{\text{tp.Rd.r1}} := \min(F_{\text{T.1.Rd}}, F_{\text{T.2.Rd}}, F_{\text{T.3.Rd}}) = 225.72 \cdot \text{kN}$$

Ruuvirivin jäykkyys saadaan määritettyä efektiivisten leveyksien mukaan käyttämällä pienintä efektiivistä leveyttä joko ruuvirivinä tai ruuviryhmän osana tarkasteltuna. Nyt vain yksi ruuvirivi, joten ruuviryhmiä ei voi muodostua

$$l_{\text{eff.p.r1}} := \min(l_{\text{eff.l.p.r1}}, l_{\text{eff.2p.r1}}) = 239.288 \cdot \text{mm}$$

$$k_{5.r1} := \frac{0.9 \cdot l_{\text{eff.p.r1}} \cdot t_p^3}{m_p^3} = 5.03 \cdot \text{mm}$$

Palkin uuman veto

Palkin uuman vedossa käytetään päätylevyn taivutuksessa määritettyjä efektiivisiä leveyksiä

Ensimmäinen ruuvirivi - *Palkin vedetyn laipan alapuolella oleva ensimmäinen ruuvirivi*

$$b_{\text{eff.t.wb.r1}} := \min(l_{\text{eff.l.p.r1}}, l_{\text{eff.2p.r1}}) = 239.288 \cdot \text{mm}$$

$$F_{\text{t.wb.Rd.r1}} := \frac{b_{\text{eff.t.wb.r1}} \cdot t_{\text{wb}} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 671.204 \cdot \text{kN}$$

Standardin 1993-1-8 mukaan palkin vedetty uuma voidaan olettaa huomattavasti muita peruskomponentteja jäykemmäksi ja se voidaan jättää liitoksen kiertymisjäykkyyden tarkastelussa ottamatta huomioon.

Ruuvirivien kapasiteetit rivien peruskomponenttien mukaan

$$F_{fc.Rd.r1} = 318.499 \cdot \text{kN} \quad \text{Pilarin laipan taivutus}$$

$$F_{t.wc.Rd.r1} = 427.946 \cdot \text{kN} \quad \text{Pilarin uuman veto}$$

$$F_{tp.Rd.r1} = 225.72 \cdot \text{kN} \quad \text{Päätylevyn taivutus}$$

$$F_{t.wb.Rd.r1} = 671.204 \cdot \text{kN} \quad \text{Palkin uuman veto}$$

$$F_{t.Rd.r1} := \min(F_{fc.Rd.r1}, F_{t.wc.Rd.r1}, F_{tp.Rd.r1}, F_{t.wb.Rd.r1}) = 225.72 \cdot \text{kN}$$

Ruuviryhmien ja ruuviryhmien keskinäinen vaikutus sekä liitoksen voimien sisäinen tasapaino

Puristuspuolen kapasiteetit

$$V_{wp.Rd} = 398.978 \cdot \text{kN} \quad \text{Pilarin uuman leikkaus}$$

$$F_{c.wc.Rd} = 457.128 \cdot \text{kN} \quad \text{Pilarin uuman poikittainen puristus}$$

$$F_{c.fb.Rd} = 1246.658 \cdot \text{kN} \quad \text{Palkin uuman puristus}$$

$$F_{comp.Rd} := \min\left(\frac{V_{wp.Rd}}{\beta}, F_{c.wc.Rd}, F_{c.fb.Rd}\right) = 398.978 \cdot \text{kN}$$

Puristuspuolen kapasiteetti rajaa ruuvirivien kapasiteetit seuraavasti

$$F_{t.Rd.r1} := \min(F_{t.Rd.r1}, F_{comp.Rd}) = 225.72 \cdot \text{kN}$$

Nyt vain yksi ruuvirivi, joten ruuviryhmiä ei voi muodostua ja ruuviryhmien vaikutusta ei tarkastella. Samoin ylempien ruuvirivien kapasiteetin rajaavaa vaikutusta ei tarvi tarkastella.

Momenttikapasiteetti

$$M_{j,Rd.1} := F_{t,Rd.r1} \cdot h_{r1} = 94.577 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Kiertymäjäykkyys

Ruuvirivin efektiivinen jäykkyys

$$k_{3,r1} = 9.282 \cdot \text{mm} \quad \text{Pilarin uuman veto}$$

$$k_{4,r1} = 16.974 \cdot \text{mm} \quad \text{Pilarin laipan taivutus}$$

$$k_{5,r1} = 5.03 \cdot \text{mm} \quad \text{Päätylevyn taivutus}$$

$$k_{10} = 12.12 \cdot \text{mm} \quad \text{Ruuvin veto}$$

$$k_{\text{eff},r1} := \frac{1}{\frac{1}{k_{3,r1}} + \frac{1}{k_{4,r1}} + \frac{1}{k_{5,r1}} + \frac{1}{k_{10}}} = 2.232 \cdot \text{mm}$$

Liitoksen sisäinen momenttivarsi

$$z_{\text{eq},1} := \frac{k_{\text{eff},r1} \cdot h_{r1}^2}{k_{\text{eff},r1} \cdot h_{r1}} = 419 \cdot \text{mm}$$

Vetopuolen ruuvirivien ekvivalentti jäykkyys

$$z_1 = 100 \cdot \text{mm}$$

$$k_{\text{eq},1} := \frac{k_{\text{eff},r1} \cdot h_{r1}}{z_{\text{eq},1}} = 2.232 \cdot \text{mm}$$

$$h_{r1} = 419 \cdot \text{mm}$$

Puristuspuolen jäykkyydet

Vain yksi ruuvirivi

$$k_{1,1} := \frac{0.38 \cdot A_{vc}}{\beta \cdot z_{\text{eq},1}} = 2.532 \cdot \text{mm}$$

Pilarin uuman leikkaus

$$k_2 = 10.425 \cdot \text{mm}$$

Pilarin uuman poikittainen puristus

Tarkastuslaskelmissa ei ole otettu huomioon liitoksen kuormituksia, joten

ja kiertymäjäykkyydeksi saadaan

$$\mu := 1$$

$$S_{j,1} := \frac{E \cdot z_{\text{eq},1}^2}{\mu \cdot \left(\frac{1}{k_{1,1}} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_{\text{eq},1}} \right)} = 39271.17 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

LIITE D: Ruuvirivin lisäämisen vaikutus kiertymäjäykkyyteen, kaksi ruuviriviä, laskentapohja

Osavarmuuskertoimet

$$\gamma_{M0} := 1.0 \quad \gamma_{M1} := 1.0 \quad \gamma_{M2} := 1.25$$

Pilarin, palkin ja päätylevyn materiaali

$$f_y := 275 \cdot \text{MPa} \quad f_u := 430 \cdot \text{MPa} \quad E := 210 \cdot \text{GPa} \quad \nu := 0.3 \quad \rho := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Pilari HE 220 B

$$h_c := 220 \cdot \text{mm} \quad b_c := 220 \cdot \text{mm} \quad t_{fc} := 16 \cdot \text{mm} \quad t_{wc} := 9.5 \cdot \text{mm} \quad r_c := 18 \cdot \text{mm}$$

$$d_{wc} := h_c - 2 \cdot (t_{fc} + r_c) = 152 \cdot \text{mm}$$

$$A_c := 9104.124 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{vc} := A_c - 2 \cdot b_c \cdot t_{fc} + t_{fc} \cdot (t_{wc} + 2 \cdot r_c) = 2792.124 \cdot \text{mm}^2$$

Palkki

$$h_b := 500 \cdot \text{mm} \quad b_b := 200 \cdot \text{mm} \quad t_{fb} := 16 \cdot \text{mm} \quad t_{wb} := 10.2 \cdot \text{mm} \quad r_b := 21 \cdot \text{mm}$$

$$d_{wb} := h_b - 2 \cdot (t_{fb} + r_b) = 426 \cdot \text{mm}$$

$$A_b := 11552.158 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{vb} := A_b - 2 \cdot b_b \cdot t_{fb} + t_{fb} \cdot (t_{wb} + 2 \cdot r_b) = 5987.358 \cdot \text{mm}^2$$

$$W_{pl,y} := 2194117.98 \cdot \text{mm}^3$$

$$M_{c,Rd} := \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 603.382 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Päätylevy

$$t_p := 12 \cdot \text{mm} \quad h_p := 554 \cdot \text{mm} \quad b_p := b_b = 200 \cdot \text{mm} \quad l_{up} := 27 \cdot \text{mm} \quad l_{lo} := 27 \cdot \text{mm}$$

$$z_{cc} := h_p - l_{lo} - 0.5 \cdot t_{fb} = 519 \cdot \text{mm}$$

Ruuvit

Käytetään M24 ruuveja lujuusluokalla 8.8

$$d := 24 \cdot \text{mm}$$

$$d_0 := \begin{cases} d + 1 \cdot \text{mm} & \text{if } d \leq 12 \cdot \text{mm} \\ d + 2 \cdot \text{mm} & \text{if } 12 \cdot \text{mm} < d < 30 \cdot \text{mm} \\ d + 3 \cdot \text{mm} & \text{otherwise} \end{cases} = 26 \cdot \text{mm}$$

$$f_{yb} := 0.8 \cdot 800 \cdot \text{MPa} = 640 \cdot \text{MPa} \quad f_{ub} := 800 \cdot \text{MPa}$$

Jätetään leikkausvoimien tarkastelu pois, jotenka vain ruuvien vetokapasiteetti tarvitaan

$$k_2 := 0.9 \quad A_s := 353 \cdot \text{mm}^2$$

$$F_{t,Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 203.328 \cdot \text{kN} \quad \text{Yhden ruuvien vetokapasiteetti}$$

Ruuvien jäykkyys ruuvien venymäpituuden mukaan

$$h_{\text{nut}} := 0.925d = 22.2 \cdot \text{mm} \quad h_{\text{bolt}} := 0.625 \cdot d = 15 \cdot \text{mm}$$

$$L_b := 0.5 \cdot (h_{\text{nut}} + h_{\text{bolt}}) + t_{fc} + t_p = 46.6 \cdot \text{mm}$$

$$k_{l0} := \frac{1.6 \cdot A_s}{L_b} = 12.12 \cdot \text{mm}$$

Päätylevyn hitsit

Määritetään hitsit tasalujiksi palkin kanssa, levynpaksuuksien mukaan yksinkertaistettua mitotustapaa käyttäen hitseiksi saadaan

$$\beta_w := 0.85 \quad \text{Käytetään terästä S275}$$

$$a_w := \text{ceil} \left(\frac{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot f_y}{2 \cdot \gamma_{M0} \cdot f_u} \cdot \frac{t_{wb}}{\text{mm}} \right) \cdot \text{mm} = 7 \cdot \text{mm}$$

$$a_f := \text{ceil} \left(\frac{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot f_y}{2 \cdot \gamma_{M0} \cdot f_u} \cdot \frac{t_{fb}}{\text{mm}} \right) \cdot \text{mm} = 10 \cdot \text{mm}$$

Ruuvirivien tiedot

Tarkastellaan liitosta kahdella ruuvirivillä. Molemmilla ruuviriveillä sijainti palkin laipan puolella luokitellaan olevan *Muu reunan ruuvirivi*. Päätylevyn puolella ensimmäinen ruuvirivi luokitellaan olevan *Palkin vedetyn laipan alapuolella oleva ensimmäinen ruuvirivi* ja toinen ruuvirivi luokitellaan olevan *Muu reunan ruuvirivi*.

Ensimmäisen ruuvirivin paikka pidetään vakiona ja toisen ruuvirivin paikka pidetään muuttujana. Molemmilla ruuviriveillä käytetään kuitenkin samoja reunaetäisyyksiä.

$$e_p := 45 \cdot \text{mm}$$

$$w := b_p - 2 \cdot e_p = 110 \cdot \text{mm}$$

$$e_c := 0.5 \cdot (b_c - w) = 55 \cdot \text{mm}$$

$$m_p := 0.5 \cdot w - 0.5 \cdot t_{wb} - 0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 41.98 \cdot \text{mm}$$

$$m_c := 0.5 \cdot w - 0.5 \cdot t_{wc} - 0.8 \cdot r_c = 35.85 \cdot \text{mm}$$

$$e_{\min} := \min(e_p, e_c) = 45 \cdot \text{mm}$$

Liitos jatkuvan pilarin keskellä ja oletetaan kerroskorkeudeksi 4 m

$$e_1 := 4 \cdot \text{m}$$

Ensimmäisen ruuvirivin paikaksi päätylevyn yläreunasta valitaan

$$z_1 = 100 \cdot \text{mm}$$

$$m_2 := z_1 - l_{up} - t_{fb} - 0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_f = 45.686 \cdot \text{mm}$$

$$h_{r1} := z_{cc} - z_1 = 419 \cdot \text{mm}$$

Toisen ruuvirivin paikka määritetään ruuvien keskiöetäisyyden mukaan, ruuvien keskiöetäisyyttä käytetään tarkastelussa muuttujana

$$p = 270 \cdot \text{mm} \quad \Rightarrow \quad z_2 := z_1 + p = 370 \cdot \text{mm}$$

$$h_{r2} := z_{cc} - z_2 = 149 \cdot \text{mm}$$

Kapasiteetti ja jäykkyys

Pilarin uuman leikkaus

$$V_{wp.Rd} := \frac{0.9 \cdot f_y \cdot A_{vc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 398.978 \cdot \text{kN}$$

Pilarin uuman leikkauksen jäykkyys pitää laskea sen jälkeen, kun liitoksen sisäinen momenttivarsi tiedetään.

Pilarin uuman poikittainen puristus

$$s_c := r_c \quad s_p := \min(2 \cdot t_p, t_p + l_{lo}) = 24 \cdot \text{mm}$$

$$b_{\text{eff.c.wc}} := t_{fb} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_f + 5 \cdot (t_{fc} + s_c) + s_p = 238.284 \cdot \text{mm}$$

Yksipuolinen liitos jatkuvan pilarin keskellä, taulukon 5.4 mukaan voidaan käyttää

$$\beta := 1 \quad \Rightarrow \quad \omega = \omega_1$$

$$\omega := \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \cdot \left(\frac{b_{\text{eff.c.wc}} \cdot t_{\text{wc}}}{A_{\text{vc}}} \right)^2}} = 0.734$$

$$\lambda_p := 0.932 \cdot \sqrt{\frac{b_{\text{eff.c.wc}} \cdot d_{\text{wc}} \cdot f_y}{E \cdot t_{\text{wc}}^2}} = 0.676$$

$$\rho_1 := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_p \leq 0.72 \\ \frac{\lambda_p - 0.2}{\lambda_p^2} & \text{otherwise} \end{cases} = 1$$

Jätetään tässä tarkastelussa liitokseen vaikuttavat kuormitukset huomioimatta, joten

$$k_{\text{wc}} := 1$$

$$F_{\text{c.wc.Rd}} := \min \left(\frac{\omega \cdot k_{\text{wc}} \cdot b_{\text{eff.c.wc}} \cdot t_{\text{wc}} \cdot f_y}{\gamma_{\text{M0}}}, \frac{\omega \cdot k_{\text{wc}} \cdot \rho_1 \cdot b_{\text{eff.c.wc}} \cdot t_{\text{wc}} \cdot f_y}{\gamma_{\text{M0}}} \right) = 457.128 \cdot \text{kN}$$

$$k_2 := \frac{0.7 \cdot b_{\text{eff.c.wc}} \cdot t_{\text{wc}}}{d_{\text{wc}}} = 10.425 \cdot \text{mm}$$

Palkin uuman puristus

$$F_{\text{c.fb.Rd}} := \frac{M_{\text{c.Rd}}}{h_b - t_{\text{fb}}} = 1246.658 \cdot \text{kN}$$

Standardin mukaan palkin uuma on muihin komponentteihin nähden niin jäykkä, että se voidaan jättää kiertymisjäykkyyden laskennassa huomioimatta

Pilarin laipan taivutus

Edellä esitetyn mukaisesti pilarin laipan puolella ruuvirivit luokitellaan olevan *Muu reunan ruuvirivi*

$$l_{\text{eff.cp.f}} := \min(2 \cdot \pi \cdot m_c, \pi \cdot m_c + 2 \cdot e_1) = 225.252 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{eff.nc.f}} := \min(4 \cdot m_c + 1.25 \cdot e_c, 2 \cdot m_c + 0.625 \cdot e_c + e_1) = 212.15 \cdot \text{mm}$$

$$\Rightarrow l_{\text{eff},1f} := \min(l_{\text{eff},nc,f}, l_{\text{eff},cp,f}) = 212.15 \cdot \text{mm} \quad \text{jossa molemmille ruuviriveille yksinään tarkasteltuna on samat T-osien efektiiviset leveydet}$$

$$l_{\text{eff},2f} := l_{\text{eff},nc,f} = 212.15 \cdot \text{mm}$$

Kahden ruuvirivin muodostaman ruuviryhmän tapauksessa ruuviriveille saadaan efektiiviset leveydet

$$l_{\text{eff},cp,fg} := \min(\pi \cdot m_c + p, 2 \cdot e_1 + p) = 382.626 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{eff},nc,fg} := \min(2 \cdot m_c + 0.625 \cdot e_c + 0.5 \cdot p, e_1 + 0.5 \cdot p) = 241.075 \cdot \text{mm}$$

$$\Rightarrow l_{\text{eff},1fg} := \min(2 \cdot l_{\text{eff},cp,fg}, 2 \cdot l_{\text{eff},nc,fg}) = 482.15 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{eff},2fg} := 2 \cdot l_{\text{eff},nc,fg} = 482.15 \cdot \text{mm}$$

jotka ovat ruuviryhmän T-osan teholliset leveydet

Nyt ruuvirivien ja ruuviryhmien kapasiteetti psytytään laskemaan T-osan tietojen mukaan.

$$n_c := \min(e_{\min}, 1.25 \cdot m_c) = 44.813 \cdot \text{mm}$$

Ruuviriveinä tarkasteltuna

$$M_{pl,1,Rd} := \frac{0.25 \cdot l_{\text{eff},1f} \cdot t_{fc}^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 3.734 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{T,1,Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_c} = 416.607 \cdot \text{kN}$$

$$M_{pl,2,Rd} := \frac{0.25 \cdot l_{\text{eff},2f} \cdot t_{fc}^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 3.734 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{T,2,Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n_c \cdot 2 \cdot F_{t,Rd}}{m_c + n_c} = 318.499 \cdot \text{kN}$$

$$F_{T,3,Rd} := 2 \cdot F_{t,Rd} = 406.656 \cdot \text{kN}$$

$$F_{fc,Rd,r1} := \min(F_{T,1,Rd}, F_{T,2,Rd}, F_{T,2,Rd}) = 318.499 \cdot \text{kN} \quad \text{Molemmille ruuviriveille}$$

$$F_{fc,Rd,r2} := F_{fc,Rd,r1}$$

Ruuviryhmänä tarkasteltuna

$$M_{pl,1,Rd} := \frac{0.25 \cdot l_{\text{eff},1fg} \cdot t_{fc}^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 8.486 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{T,1,Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_c} = 946.816 \cdot \text{kN}$$

$$M_{pl,2,Rd} := \frac{0.25 \cdot l_{\text{eff},2fg} \cdot t_{fc}^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 8.486 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{T,2,Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n_c \cdot 4 \cdot F_{t,Rd}}{m_c + n_c} = 662.244 \cdot \text{kN}$$

$$F_{T,3,Rd} := 4 \cdot F_{t,Rd} = 813.312 \cdot \text{kN}$$

$$F_{fc,Rd,g} := \min(F_{T,1,Rd}, F_{T,2,Rd}, F_{T,3,Rd}) = 662.244 \cdot \text{kN}$$

Ruuvirivin laipan taivutuksen jäykkyys saadaan määritettyä pienimmän efektiivisen leveyden mukaan, käyttäen ruuvirinä tai ruuviryhmänä tarkastelun pienintä efektiivistä leveyttä. Nyt molempien ruuvirivien tiedot ovat samat laipan puolella tarkasteltuna, joten

$$l_{\text{eff.f}} := \min(l_{\text{eff.1f}}, l_{\text{eff.2f}}, l_{\text{eff.cp.fg}}, l_{\text{eff.nc.fg}}) = 212.15 \cdot \text{mm}$$

$$k_{4,r1} := \frac{0.9 \cdot l_{\text{eff.f}} \cdot t_{\text{fc}}^3}{m_c^3} = 16.974 \cdot \text{mm} \quad \text{Molemmille ruuviriveille}$$

$$k_{4,r2} := k_{4,r1}$$

Pilarin uuman poikittainen veto

Pilarin uuman poikittainen veto tarkastellaan edellä määritettyjen tehollisten leveyksien mukaan sekä ruuviriveille, että ruuviryhmille.

Ruuviriveinä tarkasteltuna, molemmilla ruuviriveillä samat efektiiviset leveydet laipan puolella

$$b_{\text{eff.t.wc.r}} := \min(l_{\text{eff.1f}}, l_{\text{eff.2f}}) = 212.15 \cdot \text{mm}$$

$$\beta := 1 \quad \Rightarrow \quad \omega = \omega_1$$

$$\omega_r := \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \cdot \left(\frac{b_{\text{eff.t.wc.r}} \cdot t_{\text{wc}}}{A_{\text{vc}}} \right)^2}} = 0.772$$

$$F_{\text{t.wc.Rd.r1}} := \frac{\omega_r \cdot b_{\text{eff.t.wc.r}} \cdot t_{\text{wc}} \cdot f_y}{\gamma_{\text{M0}}} = 427.946 \cdot \text{kN} \quad \text{Molemmille ruuviriveille}$$

$$F_{\text{t.wc.Rd.r2}} := F_{\text{t.wc.Rd.r1}}$$

Ruuviryhmänä tarkasteltuna

$$b_{\text{eff.t.wc.g}} := \min(l_{\text{eff.1fg}}, l_{\text{eff.2fg}}) = 482.15 \cdot \text{mm}$$

$$\beta := 1 \quad \Rightarrow \quad \omega = \omega_1$$

$$\omega_g := \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \cdot \left(\frac{b_{\text{eff.t.wc.g}} \cdot t_{\text{wc}}}{A_{\text{vc}}} \right)^2}} = 0.471$$

$$F_{\text{t.wc.Rd.g}} := \frac{\omega_g \cdot b_{\text{eff.t.wc.g}} \cdot t_{\text{wc}} \cdot f_y}{\gamma_{\text{M0}}} = 593.886 \cdot \text{kN}$$

Ruuvirivin pilarin uuman vedon jäykkyys saadaan määritettyä pienimmän efektiivisen leveyden mukaan, käyttäen ruuvirinä tai ruuviryhmänä tarkastelun pienintä efektiivistä leveyttä. Nyt molempien ruuvirivien tiedot ovat samat laipan puolella tarkasteltuna, joten

$$b_{\text{eff.t.wc}} := \min(l_{\text{eff.1f}}, l_{\text{eff.2f}}, l_{\text{eff.cp.fg}}, l_{\text{eff.nc.fg}}) = 212.15 \cdot \text{mm}$$

$$k_{3.r1} := \frac{0.7 \cdot b_{\text{eff.t.wc}} \cdot t_{\text{wc}}}{d_{\text{wc}}} = 9.282 \cdot \text{mm}$$

$$k_{3.r2} := k_{3.r1}$$

Päätylevyn taivutus

Päätylevyn puolella ruuvirivein paikat luokitellaan erilaisiksi ja siten myös molemmilla ruuviriveillä on eri efektiiviset T-osien leveydet.

Ensimmäinen ruuvirivi - *Palkin vedetyn laipan alapuolella oleva ensimmäinen ruuvirivi*

$$l_{\text{eff.cp.p.r1}} := 2 \cdot \pi \cdot m_p = 263.771 \cdot \text{mm}$$

$$\lambda_1 := \frac{m_p}{m_p + e_p} = 0.483 \quad \Rightarrow \quad \alpha := 5.6974$$

$$\lambda_2 := \frac{m_2}{m_p + e_p} = 0.525$$

$$l_{\text{eff.nc.p.r1}} := \alpha \cdot m_p = 239.179 \cdot \text{mm}$$

$$\Rightarrow l_{\text{eff.1p.r1}} := \min(l_{\text{eff.cp.p.r1}}, l_{\text{eff.nc.p.r1}}) = 239.179 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{eff.2p.r1}} := l_{\text{eff.nc.p.r1}} = 239.179 \cdot \text{mm}$$

$$n_p := \min(e_{\text{min}}, 1.25 \cdot m_p) = 45 \cdot \text{mm}$$

$$M_{\text{pl.1.Rd}} := \frac{0.25 \cdot l_{\text{eff.1p.r1}} \cdot t_p^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 2.368 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{\text{T.1.Rd}} := \frac{4 \cdot M_{\text{pl.1.Rd}}}{m_p} = 225.617 \cdot \text{kN}$$

$$M_{\text{pl.2.Rd}} := \frac{0.25 \cdot l_{\text{eff.2p.r1}} \cdot t_p^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 2.368 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{\text{T.2.Rd}} := \frac{2 \cdot M_{\text{pl.2.Rd}} + n_p \cdot 2 \cdot F_{\text{t.Rd}}}{m_p + n_p} = 264.833 \cdot \text{kN}$$

$$F_{\text{T.3.Rd}} := 2 \cdot F_{\text{t.Rd}} = 406.656 \cdot \text{kN}$$

$$F_{\text{tp.Rd.r1}} := \min(F_{\text{T.1.Rd}}, F_{\text{T.2.Rd}}, F_{\text{T.3.Rd}}) = 225.617 \cdot \text{kN}$$

Toinen ruuvirivi - *Muu reunan ruuvirivi*

$$l_{\text{eff.cp.p.r2}} := 2 \cdot \pi \cdot m_p = 263.771 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{eff.nc.p.r2}} := 4 \cdot m_p + 1.25 \cdot e_p = 224.172 \cdot \text{mm}$$

$$\Rightarrow l_{\text{eff.1p.r2}} := \min(l_{\text{eff.cp.p.r2}}, l_{\text{eff.nc.p.r2}}) = 224.172 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{eff.2p.r2}} := l_{\text{eff.nc.p.r2}} = 224.172 \cdot \text{mm}$$

$$M_{\text{pl.1.Rd}} := \frac{0.25 \cdot l_{\text{eff.1p.r2}} \cdot t_p^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 2.219 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{\text{pl.1.Rd}}}{m_p} = 211.46 \cdot \text{kN}$$

$$M_{\text{pl.2.Rd}} := \frac{0.25 \cdot l_{\text{eff.2p.r2}} \cdot t_p^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 2.219 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{\text{pl.2.Rd}} + n_p \cdot 2 \cdot F_{t.Rd}}{m_p + n_p} = 261.417 \cdot \text{kN}$$

$$F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd} = 406.656 \cdot \text{kN}$$

$$F_{tp.Rd.r2} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) = 211.46 \cdot \text{kN}$$

Ruuviryhmänä tarkasteltuna

Palkin vedetyn laipan alapuolella oleva ensimmäinen ruuvirivi

$$l_{\text{eff.cp.pg.r1}} := \pi \cdot m_p + p = 401.885 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{eff.nc.pg.r1}} := 0.5 \cdot p + \alpha \cdot m_p - (2 \cdot m_p + 0.625 \cdot e_p) = 262.093 \cdot \text{mm}$$

Muu reunan ruuvirivi

$$l_{\text{eff.cp.pg.r2}} := \pi \cdot m_p + p = 401.885 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{eff.nc.pg.r2}} := 2 \cdot m_p + 0.625 \cdot e_p + 0.5 \cdot p = 247.086 \cdot \text{mm}$$

$$\Rightarrow l_{\text{eff.1pg}} := \min(l_{\text{eff.cp.pg.r1}} + l_{\text{eff.cp.pg.r2}}, l_{\text{eff.nc.pg.r1}} + l_{\text{eff.nc.pg.r2}}) = 509.179 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{eff.2pg}} := l_{\text{eff.nc.pg.r1}} + l_{\text{eff.nc.pg.r2}} = 509.179 \cdot \text{mm}$$

$$M_{\text{pl.1.Rd}} := \frac{0.25 \cdot l_{\text{eff.1pg}} \cdot t_p^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 5.041 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{\text{pl.1.Rd}}}{m_p} = 480.307 \cdot \text{kN}$$

$$M_{\text{pl.2.Rd}} := \frac{0.25 \cdot l_{\text{eff.2pg}} \cdot t_p^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 5.041 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{\text{pl.2.Rd}} + n_p \cdot 4 \cdot F_{t.Rd}}{m_p + n_p} = 536.682 \cdot \text{kN}$$

$$F_{T.3.Rd} := 4 \cdot F_{t.Rd} = 813.312 \cdot \text{kN}$$

$$F_{tp.Rd.g} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) = 480.307 \cdot \text{kN}$$

Ruuvirivien jäykkyys saadaan määritettyä efektiivisten leveyksien mukaan käyttämällä pienintä efektiivistä leveyttä joko ruuvirivinä tai ruuviryhmänä osana tarkasteltuna

$$l_{eff.p.r1} := \min(l_{eff.1p.r1}, l_{eff.2p.r1}, l_{eff.cp.pg.r1}, l_{eff.nc.pg.r1}) = 239.179 \cdot \text{mm}$$

$$k_{5.r1} := \frac{0.9 \cdot l_{eff.p.r1} \cdot t_p^3}{m_p^3} = 5.028 \cdot \text{mm}$$

$$l_{eff.p.r2} := \min(l_{eff.1p.r2}, l_{eff.2p.r2}, l_{eff.cp.pg.r2}, l_{eff.nc.pg.r2}) = 224.172 \cdot \text{mm}$$

$$k_{5.r2} := \frac{0.9 \cdot l_{eff.p.r2} \cdot t_p^3}{m_p^3} = 4.712 \cdot \text{mm}$$

Palkin uuman veto

Palkin uuman vedossa käytetään päätylevyn taivutuksessa määritettyjä efektiivisiä leveyksiä

Ensimmäinen ruuvirivi - *Palkin vedetyn laipan alapuolella oleva ensimmäinen ruuvirivi*

$$b_{eff.t.wb.r1} := \min(l_{eff.1p.r1}, l_{eff.2p.r1}) = 239.179 \cdot \text{mm}$$

$$F_{t.wb.Rd.r1} := \frac{b_{eff.t.wb.r1} \cdot t_{wb} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 670.898 \cdot \text{kN}$$

Toinen ruuvirivi - *Muu reunan ruuvirivi*

$$b_{eff.t.wb.r2} := \min(l_{eff.1p.r2}, l_{eff.2p.r2}) = 224.172 \cdot \text{mm}$$

$$F_{t.wb.Rd.r2} := \frac{b_{eff.t.wb.r2} \cdot t_{wb} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 628.801 \cdot \text{kN}$$

Ruuviryhmänä tarkasteltuna

$$b_{eff.t.wb.g} := \min(l_{eff.1pg}, l_{eff.2pg}) = 509.179 \cdot \text{mm}$$

$$F_{t.wb.Rd.g} := \frac{b_{eff.t.wb.g} \cdot t_{wb} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 1428.248 \cdot \text{kN}$$

Standardin 1993-1-8 mukaan palkin vedetty uuma voidaan olettaa huomattavasti muita

peruskomponentteja jäykemmäksi ja se voidaan jättää liitoksen kiertymisjäykkyyden tarkastelussa ottamatta huomioon.

Ruuvirivien kapasiteetit rivien peruskomponenttien mukaan

$$F_{fc.Rd.r1} = 318.499 \cdot \text{kN} \quad \text{Pilarin laipan taivutus}$$

$$F_{t.wc.Rd.r1} = 427.946 \cdot \text{kN} \quad \text{Pilarin uuman veto}$$

$$F_{tp.Rd.r1} = 225.617 \cdot \text{kN} \quad \text{Päätylevyn taivutus}$$

$$F_{t.wb.Rd.r1} = 670.898 \cdot \text{kN} \quad \text{Palkin uuman veto}$$

$$F_{t.Rd.r1} := \min(F_{fc.Rd.r1}, F_{t.wc.Rd.r1}, F_{tp.Rd.r1}, F_{t.wb.Rd.r1}) = 225.617 \cdot \text{kN}$$

$$F_{fc.Rd.r2} = 318.499 \cdot \text{kN} \quad \text{Pilarin laipan taivutus}$$

$$F_{t.wc.Rd.r2} = 427.946 \cdot \text{kN} \quad \text{Pilarin uuman veto}$$

$$F_{tp.Rd.r2} = 211.46 \cdot \text{kN} \quad \text{Päätylevyn taivutus}$$

$$F_{t.wb.Rd.r2} = 628.801 \cdot \text{kN} \quad \text{Palkin uuman veto}$$

$$F_{t.Rd.r2} := \min(F_{fc.Rd.r2}, F_{t.wc.Rd.r2}, F_{tp.Rd.r2}, F_{t.wb.Rd.r2}) = 211.46 \cdot \text{kN}$$

Ruuviryhmän kapasiteetti peruskomponenttien mukaan

$$F_{fc.Rd.g} = 662.244 \cdot \text{kN} \quad \text{Pilarin laipan taivutus}$$

$$F_{t.wc.Rd.g} = 593.886 \cdot \text{kN} \quad \text{Pilarin uuman veto}$$

$$F_{tp.Rd.g} = 480.307 \cdot \text{kN} \quad \text{Päätylevyn taivutus}$$

$$F_{t.wb.Rd.g} = 1428.248 \cdot \text{kN} \quad \text{Palkin uuman veto}$$

$$F_{t.Rd.g} := \min(F_{fc.Rd.g}, F_{t.wc.Rd.g}, F_{tp.Rd.g}, F_{t.wb.Rd.g}) = 480.307 \cdot \text{kN}$$

Ruuviryhmien ja ruuviryhmien keskinäinen vaikutus sekä liitoksen voimien sisäinen tasapaino

Puristuspuolen kapasiteetit

$$V_{wp.Rd} = 398.978 \cdot \text{kN} \quad \text{Pilarin uuman leikkaus}$$

$$F_{c.wc.Rd} = 457.128 \cdot \text{kN} \quad \text{Pilarin uuman poikittainen puristus}$$

$$F_{c.fb.Rd} = 1246.658 \cdot \text{kN} \quad \text{Palkin uuman puristus}$$

$$F_{comp.Rd} := \min\left(\frac{V_{wp.Rd}}{\beta}, F_{c.wc.Rd}, F_{c.fb.Rd}\right) = 398.978 \cdot \text{kN}$$

Puristuspuolen kapasiteetti rajaa ruuvirivien kapasiteetit seuraavasti

$$F_{t.Rd.r1} := \min(F_{t.Rd.r1}, F_{comp.Rd}) = 225.617 \cdot \text{kN}$$

$$F_{t.Rd.r2} := \min(F_{t.Rd.r2}, F_{comp.Rd} - F_{t.Rd.r1}) = 173.361 \cdot \text{kN}$$

Ruuviryhmän kapasiteetti rajaa ruuvirivien kapasiteetit seuraavasti

$$F_{t.Rd.r1} := \min(F_{t.Rd.r1}, F_{t.Rd.g}) = 225.617 \cdot \text{kN}$$

$$F_{t.Rd.r2} := \min(F_{t.Rd.r2}, F_{t.Rd.g} - F_{t.Rd.r1}) = 173.361 \cdot \text{kN}$$

Ylimmän ruuvirivin kapasiteetti rajaa alemman ruuvirivin kapasiteetin arvoon

$$F_{t.Rd.r2} := \begin{cases} \min\left(F_{t.Rd.r2}, F_{t.Rd.r1} \cdot \frac{h_{r2}}{h_{r1}}\right) & \text{if } F_{t.Rd.r1} > 1.9 \cdot F_{t.Rd} \\ F_{t.Rd.r2} & \text{otherwise} \end{cases} = 173.361 \cdot \text{kN}$$

Kiertymäjäykkyys

Ruuvirivien efektiiviset jäykkydet

$$k_{3.r1} = 9.282 \cdot \text{mm} \quad \text{Pilarin uuman veto}$$

$$k_{4.r1} = 16.974 \cdot \text{mm} \quad \text{Pilarin laipan taivutus}$$

$$k_{5.r1} = 5.028 \cdot \text{mm} \quad \text{Päätylevyn taivutus}$$

$$k_{10} = 12.12 \cdot \text{mm} \quad \text{Ruuvien veto}$$

$$k_{\text{eff}.r1} := \frac{1}{\frac{1}{k_{3.r1}} + \frac{1}{k_{4.r1}} + \frac{1}{k_{5.r1}} + \frac{1}{k_{10}}} = 2.232 \cdot \text{mm}$$

$$k_{3.r2} = 9.282 \cdot \text{mm} \quad \text{Pilarin uuman veto}$$

$$k_{4.r2} = 16.974 \cdot \text{mm} \quad \text{Pilarin laipan taivutus}$$

$$k_{5.r2} = 4.712 \cdot \text{mm} \quad \text{Päätylevyn taivutus}$$

$$k_{10} = 12.12 \cdot \text{mm} \quad \text{Ruuvien veto}$$

$$k_{\text{eff}.r2} := \frac{1}{\frac{1}{k_{3.r2}} + \frac{1}{k_{4.r2}} + \frac{1}{k_{5.r2}} + \frac{1}{k_{10}}} = 2.167 \cdot \text{mm}$$

Liitoksen sisäinen momenttivarsi

Kaksi ruuviriviä sisäinenmomenttivarsi ruuvirivien efektiivisten jäykkyyksien painopisteen mukaan

$$z_{\text{eq}} := \frac{k_{\text{eff}.r1} \cdot h_{r1}^2 + k_{\text{eff}.r2} \cdot h_{r2}^2}{k_{\text{eff}.r1} \cdot h_{r1} + k_{\text{eff}.r2} \cdot h_{r2}} = 349.692 \cdot \text{mm}$$

Vetopuolen ruuvirivien ekvivalentti jäykkyys

Kaksi ruuviriviä, vetopuolen ekvivalentti jäykkyys verrattuna ekvivalenttiseen sisäiseen momenttivarteen

$$k_{eq} := \frac{k_{eff.r1} \cdot h_{r1} + k_{eff.r2} \cdot h_{r2}}{z_{eq}} = 3.598 \cdot \text{mm}$$

Puristuspuolen jäykkyydet

Kaksi ruuviriviä

$$k_1 := \frac{0.38 \cdot A_{vc}}{\beta \cdot z_{eq}} = 3.034 \cdot \text{mm}$$

$$h_p - l_{lo} - t_{fb} - 0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_f - z_1 = 399.686 \cdot \text{mm}$$

Pilarin uuman leikkaus

$$k_2 = 10.425 \cdot \text{mm}$$

Pilarin uuman poikittainen puristus

Tarkastuslaskelmissa ei ole otettu huomioon liitoksen kuormituksia, joten

$\mu := 1$ ja kiertymäjäykkyyksiksi saadaan

Kaksi ruuviriviä

$$S_j := \frac{E \cdot z_{eq}^2}{\mu \cdot \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_{eq}} \right)} = 36504.722 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Momenttikapasiteetti

Kaksi ruuviriviä, momenttikapasiteetti sisäisen momenttivarren mukaan

$$M_{j.Rd.2} := F_{t.Rd.r1} \cdot h_{r1} + F_{t.Rd.r2} \cdot h_{r2} = 120.364 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$